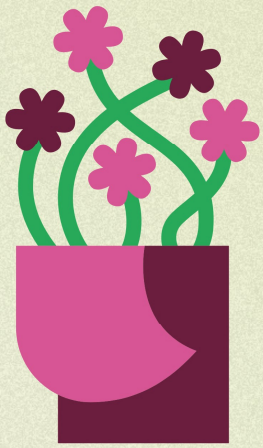
37º CICT
Ciência Delas

Anais

37º Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN





37º CICT

Ciência Delas

UFRN PROPESQ CNPq

EXPEDIENTE

APRESENTAÇÃO

O Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica (CICT) é um evento aberto à comunidade no qual todos os aproximadamente 1.800 alunos de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN (bolsistas e voluntários) apresentam os resultados de suas pesquisas desenvolvidas ao longo de um ano, como cumprimento de um plano de trabalho elaborado e orientado por um professor/pesquisador do quadro permanente da Instituição.

O CICT está entre as ações inseridas no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN, que possui entre seus objetivos: a) Contribuir para a formação e engajamento de recursos humanos em atividades de pesquisa, desenvolvimento tecnológico e inovação; b) Contribuir para a formação científica de recursos humanos que se dedicarão a qualquer atividade profissional; e c) Contribuir para a formação de recursos humanos que se dedicarão ao fortalecimento da capacidade inovadora das empresas no País.

A 37ª edição do Congresso teve como tema “Ciência Delas", estando alinhada aos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU. Ao submeter os trabalhos ao Congresso, os alunos indicaram os objetivos da Agenda 2030 aos quais suas pesquisas estavam relacionadas. Essa iniciativa visa estimular a pesquisa científica e tecnológica voltada para a busca por soluções para os desafios sociais contemporâneos. Em uma etapa inicial do CICT, denominada Mostra de Trabalhos e Vídeos de Ciência, Tecnologia e Inovação, foram realizadas as apresentações dos trabalhos submetidos pelos participantes do evento. As apresentações ocorreram de forma assíncrona, por meio de arquivos digitais (trabalho completo e vídeo), sendo disponibilizadas não só aos avaliadores do congresso pelos Sistemas da UFRN, mas também ao público em geral por meio do site do evento (www.cic.propesq.ufrn.br). Após essa etapa inicial, que ocorreu sob o formato virtual, os 48 melhores trabalhos do evento foram selecionados para apresentação oral em uma etapa complementar do congresso que ocorreu de forma presencial.

Os alunos concorreram ao 10º Prêmio Destaque na Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN, que foi instituído pela Pró-Reitoria de Pesquisa em 2017 para reforçar as ações dos programas institucionais de iniciação científica e tecnológica. O prêmio contemplou as categorias Trabalho Destaque de Iniciação Científica e Tecnológica e Vídeo Destaque de Iniciação Científica e Tecnológica e na subcategoria de Inovação. Os premiados foram agraciados com bolsas mensais de até R$ 1100,00 (mil e cem reais) durante o período de um ano. Os orientadores dos alunos premiados adquiriram precedência em relação aos demais para efeitos de concorrência no Edital de Bolsas de Pesquisa da UFRN em 2027.

Ainda em 2026, a Pró-Reitoria de Pesquisa realizou a 8ª Edição do Prêmio Pesquisador Destaque da UFRN, certame instituído em 2019 e que é concedido anualmente aos pesquisadores da instituição que tenham apresentado relevantes contribuições para o desenvolvimento da ciência em cada uma das três grandes áreas do conhecimento: Ciências da Vida; Ciências Exatas, da Terra e Engenharias; e Ciências Humanas e Sociais, Letras e Artes. Além de troféu e certificado, todos os premiados foram contemplados com auxílio no valor de R$ 10.000,00 (dez mil reais) para custear despesas específicas, discriminadas em edital, e tiveram a oportunidade de compartilhar suas experiências com os participantes do CICT 2026 em uma mesa redonda.

Além de valorizar a contribuição das mulheres para a produção do conhecimento científico, promovendo a visibilidade de suas trajetórias e reconhecendo seu papel no desenvolvimento da ciência, o congresso cumpriu três funções valiosas para a instituição: a inserção dos discentes em um ambiente acadêmico de publicação e apresentação dos resultados de pesquisa; a divulgação científica, por meio de vídeos que utilizam uma linguagem científica, porém acessível ao público em geral; e, por fim, a popularização da ciência.

PROGRAMAÇÃO

DATA	ATIVIDADE
09/10	Divulgação da lista dos pré-selecionados para concorrer ao 9º Prêmio Destaque na Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN
19/10	Abertura oficial do evento
19/10 a 23/10	CICT 2026 - Etapa presencial
20/10 a 22/10	Sessões de apresentações orais
23/10	Cerimônia de premiação e encerramento do evento

CENTRO DE TECNOLOGIA

CÓDIGO: ET0029

AUTOR: YASKARA MONTEFUSCO MOTA

COAUTOR: GABRIEL DOS SANTOS VASCONCELOS

COAUTOR: ARIADNE DE SOUZA SILVA

ORIENTADOR: RUBENS MARIBONDO DO NASCIMENTO

TÍTULO: Estudo e caracterização da imprimibilidade por direct ink writting (DIW) de peças cerâmicas filtrantes a base de diatomita

Resumo

Neste plano de trabalho, o vínculo ocorreu nos meses de setembro e outubro, período em que foram realizadas pesquisas bibliográficas acerca do estudo e caracterização da imprimibilidade por Direct Ink Writing (DIW) de peças cerâmicas filtrantes à base de diatomita. Paralelamente, iniciou-se o estudo da resina base, utilizando o Álcool Polivinílico (PVA) (Cloroquímica, Brasil; fórmula:(C_2H_4O); viscosidade: 45-55 cP; peso molecular: 72.000).

A fabricação da tinta consistiu em duas etapas: a confecção da resina — composta por PVA e água destilada — e a subsequente mistura do material base com essa resina, cujo A resina foi preparada na proporção de 1:7 (PVA em água destilada), sendo aquecida a uma temperatura de 80 °C sob agitação magnética. Em seguida, a solução permaneceu em repouso à temperatura ambiente por aproximadamente 24 horas para a redução de bolhas de ar.

A formulação da tinta foi composta por 30% em peso de resina à base de PVA, 70% em peso de Álcool P.A. e o resíduo de diatomita. A composição final da tinta para impressão totalizou 7,7 g. Por fim, o estudo contou com a análise da necessidade de aditivos, incorporando 1,5% de superplastificante e 0,2% de HPMC (hidroxipropilmetilcelulose).

Palavras-chave: PVA, diatomita, filtros

TITLE: Study and characterization of the printability of diatomite-based ceramic filter components via Direct Ink Writing (DIW)

Abstract

Under this work plan, the engagement took place during September and October, a period dedicated to literature research on the study and characterization of the printability—via Direct Ink Writing (DIW)—of diatomite-based ceramic filter components. Concurrently, the study of the base resin began, utilizing Polyvinyl Alcohol (PVA) (Cloroquímica, Brazil; formula: C_2H_4O; viscosity: 45–55 cP; molecular weight: 72,000). Ink fabrication involved two stages: preparing the resin—composed of PVA and distilled water—and subsequently mixing the base material with this resin. The resin was prepared at a 1:7 ratio (PVA to distilled water) and heated to 80°C under magnetic stirring. Afterward, the solution was left to rest at room temperature for approximately 24 hours to allow air bubbles to dissipate. The ink formulation consisted of 30 wt% PVA-based resin, 70 wt% analytical-grade alcohol, and diatomite waste. The final composition of the printing ink totaled 7.7 g. Finally, the study addressed the need for additives by incorporating 1.5% superplasticizer and 0.2% HPMC (hydroxypropyl methylcellulose).

Keywords: diatomita, pva

Introdução

.

Metodologia

.

Resultados e Discussões

.

Conclusão

.

Referências

.

Anexos



Esquema Gráfico da metodologia

CÓDIGO: ET0603

AUTOR: GIOVANNA XAVIER DE SOUZA SILVA

COAUTOR: GABRIEL DOS SANTOS VASCONCELOS

ORIENTADOR: RUBENS MARIBONDO DO NASCIMENTO

TÍTULO: Impacto da Adição de Carbeto de Tântalo nas Propriedades Microestruturais e Mecânicas dos Compósitos de NbC-FeNi-C

Resumo

Cermeto à base de NbC têm emergido como alternativas promissoras aos metal duros convencionais WC–Co, devido à sua elevada dureza, condutividade térmica, estabilidade química e maior disponibilidade de matérias-primas. Neste estudo, o efeito combinado da adição de carbeto de tântalo (TaC) e da moagem de alta energia (MAE) sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas de cermeto NbC–Fe–Ni–C foi investigado de forma sistemática. Pós compósitos, com 5% em massa de TaC, foram moídos, seguidos de sinterização sob parâmetros térmicos idênticos. A evolução de fases e o refinamento estrutural foram analisados por difração de raios X (DRX), enquanto a morfologia e a distribuição elementar foram avaliadas por MEV-FEG acoplado a EDS. A amostra moída por 10 h apresentou a distribuição de grãos mais fina e homogênea (4,947 ± 1,66 μm), alcançando elevado nível de densificação (~100% de densidade relativa) e dureza (1209,7 kgf/mm^2) com baixo desvio padrão (0,4). A moagem excessiva (15 h) levou ao crescimento de grão, atribuído à intensificação dos mecanismos de dissolução–reprecipitação durante a sinterização por fase líquida. Os resultados demonstram que o TaC atua como um eficaz estabilizador microestrutural e agente intensificador do refinamento por moagem, melhorando a homogeneidade de fases e controlando o crescimento dos carbonetos.

Palavras-chave: Cermetos; Carbeto de Tântalo; Sinterização em fase líquida.

TITLE: Impact of Tantalum Carbide Addition on the Microstructural and Mechanical Properties of NbC-FeNi-C Composites

Abstract

NbC-based cermets have emerged as promising alternatives to conventional WC–Co hardmetals due to their high hardness, thermal conductivity, chemical stability, and greater availability of raw materials. In this study, the combined effect of tantalum carbide (TaC) addition and high-energy milling (HEM) on the microstructure and mechanical properties of NbC–Fe–Ni–C cermets was systematically investigated. Composite powders containing 5 wt.% TaC were milled and subsequently sintered under identical thermal parameters. Phase evolution and structural refinement were analyzed by X-ray diffraction (XRD), while morphology and elemental distribution were evaluated by field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM) coupled with energy-dispersive spectroscopy (EDS). The sample milled for 10 h exhibited the finest and most homogeneous grain distribution (4.947 ± 1.66 μm), achieving a high degree of

densification (~100% relative density) and hardness (1209.7 kgf/mm²) with a low standard deviation (0.4). Excessive milling (15 h) resulted in grain growth, attributed to the intensification of dissolution–reprecipitation mechanisms during liquid-phase sintering. The results demonstrate that TaC acts as an effective microstructural stabilizer and milling-induced grain-refinement agent, improving phase homogeneity and controlling carbide grain growth.

Keywords: Cermeto, Tantalum Carbide e liquid phase sintering.

Introdução

Os carbetos cementados pertencem ao grupo dos compósitos de matriz metálica (CMMs). São constituídos por uma fase cerâmica, composta por partículas duras de carboneto, e por uma fase ligante metálica, que fornece suporte mecânico e a força motriz termodinâmica para a sinterização por fase líquida, em virtude de seu menor ponto de fusão [1]. O exemplo mais comum é o carbeto de tungstênio (WC), que atua como fase dura incorporada a um ligante metálico, tipicamente à base de cobalto (Co).

Atualmente, os metais duros à base de WC–Co são os materiais mais amplamente utilizados em ferramentas de corte industriais. Esses compósitos são extensivamente empregados em operações de usinagem, como torneamento, fresamento e furação [2–4], devido à presença de fases duras que conferem propriedades superiores, incluindo elevada dureza (18–22 GPa) [5], resistência à flexão de aproximadamente 2100 MPa [6], alta tenacidade à fratura (6,0–8,0 $MPa \cdot m^{1/2}$) [1–3] e excelente resistência ao desgaste [7].

Entretanto, o alto custo e os riscos à saúde do sistema WC–Co têm incentivado a busca por materiais alternativos com propriedades semelhantes [8]. Nesse contexto, cermetos à base de NbC destacam-se como candidatos promissores para ferramentas de corte [10,11]. Esses materiais apresentam elevada dureza em altas temperaturas, baixa reatividade com metais e alta condutividade térmica [9–11]. Além disso, a alta solubilidade do NbC em Fe, Ni e Co contribui para sua estabilidade térmica e maior vida útil das ferramentas. As reservas globais de nióbio também são superiores às de tungstênio, favorecendo aplicações industriais em larga escala [1].

Como fases ligantes, ferro (Fe) [11,12], níquel (Ni) [13] e ligantes baseados em ligas de alta entropia [14] têm sido investigados como potenciais substitutos do cobalto. No entanto, o uso de Fe e Ni pode resultar em crescimento significativo dos grãos de NbC durante a sinterização por fase líquida (SFL) [11–13]. Para mitigar esse efeito, a adição de carbonetos como VC, Cr_3C_2, TaC e Mo_2C é comumente empregada [1,15,16], pois esses aditivos auxiliam na formação de barreiras nos contornos de grão, reduzindo sua mobilidade e controlando efetivamente o crescimento microestrutural [10,17,18].

Um dos métodos industriais mais amplamente utilizados para modificar sistemas particulados é a moagem de alta energia (MAE), que aumenta a sinterabilidade de sistemas à base de WC, NbC e TaC por meio dos mecanismos de soldagem a frio, fratura e ressoldagem das partículas de pó [19–24]. Além disso, a MAE constitui uma rota simples e eficiente para a produção de pós nanoparticulados e para a introdução de partículas de reforço e/ou fases ligantes em ligas e compósitos [19].

O estudo recente de Basit et al. [25] sobre cermetos NbC–Fe–Ni demonstrou que o processamento via moagem de alta energia, seguido de sinterização por fase líquida, resulta em maior densificação, microestruturas mais finas e homogêneas e propriedades mecânicas superiores quando comparado às rotas convencionais de mistura de pós. Os resultados indicaram que as amostras mecanicamente ligadas apresentaram refinamento significativo de grão, maiores valores de dureza (atingindo aproximadamente 1700 HV30) e melhoria na tenacidade à fratura em comparação com a mistura em tambor.

Dessa forma, no presente estudo, analisa a influência do TaC sobre o refinamento estrutural induzido pela MAE e sobre a estabilidade microestrutural durante a sinterização por fase líquida, correlacionando os parâmetros de processamento com a constituição de fases, a densificação e a dureza. Este trabalho busca compreender de que maneira o TaC contribui para o controle microestrutural e para a otimização do desempenho em cermetos à base de NbC.

Metodologia

2.1 Materiais recebidos

As características dos pós comerciais utilizados na preparação das misturas para moagem foram as seguintes: NbC (CBMM, Brasil; C: 11,35% em massa; O: 0,29% em massa; tamanho médio de partícula: 5 μm); Fe (Riedel de Haën, D30926, Alemanha; tamanho médio de partícula: 97 μm); Ni (Merck, Alemanha; D50: 10 μm; pureza de 99,98%); e TaC (France/Merck; pureza de 99,98%; tamanho médio de partícula > 5 μm).

2.2 Modelagem composicional do cermeto de NbC

A composição nominal apresentada na Tabela 1 foi definida com base no balanceamento estequiométrico de carbono, considerando o diagrama de fases NbC–Ni–C (Fig. 1), com o objetivo de posicionar o material no campo bifásico CFC + NbC em temperaturas intermediárias e na região LÍQUIDO + NbC na temperatura de sinterização. O teor de carbono (2,2% em massa) foi ajustado de modo a evitar deslocamentos composicionais para regiões associadas à formação de grafita ou à formação de fases intermetálicas Nb–Ni, assegurando, assim, a estabilidade de fases durante o processamento térmico.

A fração total de ligante metálico de 12% em massa de Fe–Ni foi estabelecida de modo a manter consistência com composições reportadas na literatura para cermetos à base de NbC, possibilitando a comparação direta dos resultados microestruturais e mecânicos com sistemas previamente investigados. Esse teor de ligante também assegura a formação adequada de fase líquida durante a sinterização, preservando a microestrutura típica de cermeto, composta por grãos de carboneto dispersos em uma matriz metálica contínua.

2.3 Parâmetros de sinterização

Antes da etapa de sinterização, as amostras de pós moídos foram identificadas como NbC5TaC2,5; NbC5TaC5; NbC5TaC7,5; NbC5TaC10; NbC5TaC12,5 e NbC5TaC15, de acordo com o respectivo tempo de moagem empregado. Na sinterização apenas os melhores resultados de tempo de moagem foram usados, que são NbC5TaC5, NbC5TaC10 e, NbC5TaC15.

2.4 Técnicas de caracterização

Tanto os pós moídos quanto os cermetos sinterizados foram caracterizados por difração de raios X (DRX) para identificação das fases formadas, utilizando um difratômetro SHIMADZU XRD-7000, equipado com radiação Cu Kα (λ = 1,5406 Å), operando a 40 kV e 30 mA. As varreduras foram realizadas no intervalo angular de 20° a 100° (2θ), com velocidade de varredura de 5°/min e passo de 0,02°.

A morfologia, a dispersão das partículas e a microestrutura dos cermetos sinterizados foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As análises foram realizadas em um MEV por emissão de campo (FE-SEM, ZEISS Auriga 40), equipado com detector Bruker E-Flash para espectroscopia por dispersão de energia (EDS).

A dureza das amostras foi determinada pelo ensaio Vickers, com carga de 30 kgf

(HV30) e tempo de aplicação de 15 s, utilizando um durômetro (WPM LEIPZIG 308/86).

A densidade teórica dos cermetos foi calculada pela regra das misturas, conforme estabelecido em [26]. A densidade aparente das amostras sinterizadas foi medida à temperatura ambiente e pressão atmosférica pelo princípio de Arquimedes, de acordo com a norma ASTM B962-13 [27], utilizando água destilada e uma balança eletrônica Shimadzu (modelo AUW220D) com precisão de 0,1 mg.

O tamanho de grão dos carbonetos foi estimado a partir da análise de, no mínimo, 300 grãos em micrografias obtidas por elétrons retroespalhados (BSE), com aumento de 2000×, empregando o método das interseções lineares, com auxílio do software ImageJ.

Resultados e Discussões

3.1 Análise microestrutural dos cermetos sinterizados

3.1.1 Análise DRX

A Figura 3 apresenta os difratogramas de raios X (DRX) dos cermetos sinterizados NbC–5TaC5, NbC–5TaC10 e NbC–5TaC15, respectivamente. A análise por difração de raios X confirma que todas as composições são constituídas por uma solução sólida Ni–Fe com estrutura cúbica de face centrada (CFC), atuando como fase ligante metálica, juntamente com a fase NbC de estrutura cúbica.

Reflexões associadas ao TaC estão presentes em todos os difratogramas; entretanto, esses picos encontram-se sobrepostos aos do NbC, em virtude da estrutura cristalina do tipo NaCl idêntica e dos mesmos índices de Miller apresentados por ambos os carbonetos. Essa sobreposição é esperada, considerando que seus parâmetros de rede são muito próximos (NbC ≈ 4,47 Å e TaC ≈ 4,45 Å) [23].

De forma relevante, não foram detectadas fases residuais de óxidos, Nb metálico, Ta metálico ou carbonetos subestequiométricos, indicando adequada estabilidade de fases e compatibilidade química sob as condições de processamento adotadas.

Uma análise detalhada das reflexões do NbC (Fig. 3 b)) revela um deslocamento sistemático dos picos de difração para menores ângulos de 2θ à medida que o tempo de moagem aumenta. De acordo com a lei de Bragg, esse deslocamento corresponde ao aumento do espaçamento interplanar e, consequentemente, à expansão do parâmetro de rede cúbico [25]. O parâmetro de rede calculado (Fig. 3 c)) apresenta aumento progressivo com o tempo de moagem, confirmando essa modificação estrutural [11].

Essas alterações estruturais refletem não apenas a condição dos pós antes da sinterização, mas também a forma como a ativação mecânica influencia os processos difusivos subsequentes e a estabilidade de fases durante o tratamento térmico. A moagem de alta energia promove modificações morfológicas e cristalográficas significativas por meio de ciclos repetidos de deformação plástica severa, soldagem a frio, fratura e ressoldagem [19]. Como consequência, ocorre aumento expressivo da densidade de defeitos, introdução de distorções na rede cristalina e armazenamento de elevadas tensões internas nas partículas de carboneto [19,25].

O deslocamento sistemático dos picos de NbC para menores ângulos de difração podem ser associados ao acúmulo de defeitos cristalográficos e à microdeformação residual gerada durante a moagem. Tal desordem estrutural aumenta a mobilidade atômica durante a sinterização e modifica a estabilidade termodinâmica do NbC [11,19].

3.1.2 Microestrutura

A Figura 4 apresenta micrografias obtidas por MEV dos cermetos NbC–5TaC5, NbC–5TaC10 e NbC–5TaC15 (NbC–Ni–Fe–TaC). A Figura 5, por sua vez, mostra as respectivas distribuições de tamanho de grão ajustadas por função lognormal, considerando pelo menos 300 medições realizadas no software ImageJ.

As micrografias das amostras evidenciam a microestrutura característica de cermetos totalmente densificados, composta por grãos de carboneto angulares/arredondados embebidos em uma fase ligante metálica contínua de Fe–Ni [28]. Embora a densificação aparente seja satisfatória com base nas micrografias, diferenças claras no tamanho de grão, na distribuição granulométrica e na homogeneidade microestrutural são observadas em função do tempo de moagem.

A amostra NbC–5%TaC5 (Fig. 4 e 5 a)) apresenta microestrutura relativamente grosseira da fase de carboneto, com tamanho médio de grão M = 6,921 μm e desvio padrão σ = 2,795 μm. A distribuição granulométrica mais ampla e as heterogeneidades localizadas na dispersão dos carbonetos sugerem refinamento mecânico limitado dos pós de partida. Tais condições podem resultar em cinéticas não uniformes de

dissolução–reprecipitação durante a sinterização por fase líquida (SFL), contribuindo para crescimento heterogêneo de grão [25,28,29].

Em contraste, a amostra NbC–5%TaC10 (Fig. 4 e 5 b)) apresenta refinamento pronunciado da fase de carboneto, com M = 4,947 μm e σ = 1,66 μm. Essa condição também exibe distribuição mais homogênea da fase ligante Fe–Ni. A distribuição granulométrica mais estreita indica cinética de crescimento mais uniforme e maior estabilidade microestrutural durante a SFL [25,28]. A microestrutura refinada e homogênea sugere que 10 h de moagem promovem homogeneização eficaz dos pós e mecanismos controlados de dissolução–reprecipitação durante a sinterização.

Entretanto, o aumento adicional do tempo de moagem leva a comportamento distinto na amostra NbC–5%TaC15. Apesar de manter boa continuidade da fase ligante, observa-se crescimento significativo de grão (M = 9,721 μm; σ = 2,575 μm) (Fig. 4 e 5 c)). Essa tendência não monotônica demonstra que o tamanho final de grão não é governado exclusivamente pelo refinamento inicial dos pós, mas também pelos mecanismos de crescimento ativos nas etapas finais da SFL. A ativação mecânica excessiva provavelmente aumenta a energia de deformação armazenada e as taxas de difusão, acelerando o engrossamento microestrutural após a densificação estar substancialmente concluída [25, 28].

A Figura 6 apresenta micrografias de MEV juntamente com os respectivos mapas elementares obtidos por EDS das amostras sinterizadas NbC5TaC5, NbC5TaC10 e NbC5TaC15. O processo de sinterização por fase líquida (SFL) ocorre em três estágios principais: (i) formação da fase líquida e rearranjo de partículas, (ii) dissolução–reprecipitação e (iii) crescimento de grão. A eficiência desses mecanismos é fortemente influenciada pela distribuição espacial das partículas de TaC e pela homogeneidade química da fase ligante metálica Fe–Ni na matriz à base de NbC.

Para a amostra NbC5TaC5, os mapas de EDS indicam que os sinais de Nb e Ta estão predominantemente concentrados nas regiões de carboneto. Embora o Ta esteja, de modo geral,

disperso ao longo da matriz, podem ser identificadas áreas localmente enriquecidas em Ta, sugerindo homogeneização incompleta da fase de reforço. Essa heterogeneidade composicional pode influenciar o estágio inicial de formação da fase líquida durante a sinterização. Como a densificação na SFL depende do molhamento eficiente das partículas de carboneto pela fase ligante Fe–Ni, variações químicas em escala microscópica podem modificar localmente as energias interfaciais e o comportamento de molhamento [28]. Como consequência, o espalhamento do líquido e o rearranjo de partículas impulsionado por forças capilares podem ocorrer de maneira não uniforme, contribuindo potencialmente para porosidade residual e regiões com densificação incompleta [29].

Na amostra NbC5TaC10, os mapas de EDS revelam uma distribuição espacial mais homogênea de Nb, Ta, Fe e Ni ao longo de toda a microestrutura. Embora o Ta permaneça como uma fase discreta de TaC, sua dispersão no esqueleto de NbC é mais uniforme quando comparada à condição de 5 h. Durante a SFL, essa distribuição mais homogênea das fases favorece um molhamento mais consistente da fase ligante em toda a microestrutura [30–32]. Uma fase líquida bem distribuída gera forças capilares

equilibradas, melhorando o rearranjo das partículas e promovendo uma densificação mais uniforme [30–34]. Como resultado, a fase ligante metálica apresenta-se de maneira mais contínua, reduzindo o aprisionamento de poros e aprimorando a ligação interfacial entre as partículas cerâmicas e a fase Fe–Ni [30].

Para a amostra NbC5TaC15, os mapas de EDS indicam uma dispersão altamente uniforme das partículas de TaC na matriz de NbC, bem como uma fase ligante Fe–Ni bem distribuída. A ausência de aglomerados ricos em Ta sugere eficiência no processo de moagem mecânica. Essa distribuição homogênea das fases favorece a formação e espalhamento consistentes da fase líquida durante a SFL. No entanto, a ativação mecânica prolongada antes da sinterização provavelmente aumenta a energia de defeitos armazenada e intensifica as cinéticas de difusão durante o estágio de dissolução–reprecipitação [31,33]. Assim, embora a dispersão de fases e a uniformidade química em escala microscópica estejam otimizadas na condição de 15 h, o engrossamento microestrutural torna-se mais evidente à medida que o crescimento de grão passa a dominar o estágio final da SFL.

3.1.3 Crescimento e morfologia dos grãos

Nas micrografias de MEV (Fig. 4), as características morfológicas indicam que a microestrutura é predominantemente composta por grãos de carboneto angulares embebidos em uma fase ligante metálica contínua de Fe–Ni. Um aspecto notável é a fração relativamente baixa de grãos cuboidais bem definidos, tipicamente associados a regiões ricas em ligante Fe [11,35]. Em vez disso, a fase ligante apresenta-se distribuída de forma mais uniforme ao longo das interfaces dos carbonetos, formando uma rede contínua em vez de domínios metálicos discretos.

Em cermetos à base de NbC contendo predominantemente ligante Fe, regiões metálicas poligonais são frequentemente observadas após a sinterização devido à segregação localizada do ligante e ao comportamento de molhamento nos contornos de grão, conforme relatado por De Paula et al. [11]. Essas regiões metálicas tendem a se formar quando o ligante líquido se acumula em “piscinas” intergranulares durante a sinterização por fase líquida (SFL). No presente sistema, entretanto, a adição de TaC parece suprimir a formação desses domínios metálicos poligonais isolados [7,36]. A literatura indica que carbonetos secundários, como o TaC, podem modificar o comportamento de molhamento e reduzir a segregação do ligante ao aumentar a estabilidade interfacial carboneto–ligante [7,16]. Como consequência, o ligante tende a se espalhar de maneira mais eficiente ao longo das superfícies dos carbonetos, em vez de se concentrar em regiões localizadas.

Do ponto de vista morfológico, os grãos de carboneto exibem geometrias predominantemente angulares a subangulares, consistentes com o crescimento facetado típico de carbonetos cúbicos. Essa morfologia facetada reflete o crescimento ao longo de planos cristalográficos preferenciais característicos de sistemas à base de NbC. A maior uniformidade microestrutural está provavelmente associada à melhor dispersão dos pós e ao contato mais eficiente entre carboneto e ligante antes da sinterização.

A presença reduzida de regiões metálicas poligonais em todas as condições sugere que a composição combinada do ligante Ni–Fe, juntamente com a adição de TaC, melhora o molhamento e a ligação interfacial em comparação com sistemas ricos em Fe reportados

na literatura [7,11,35,36]. O Ni é conhecido por aumentar a molhabilidade de carbonetos refratários em relação ao Fe puro, devido à sua maior solubilidade com o NbC [7,36]. Nessas condições, o engrossamento dos carbonetos durante a SFL é predominantemente governado pelo mecanismo de dissolução-reprecipitação impulsionado por capilaridade, no qual partículas menores se dissolvem na fase líquida e reprecipitam sobre grãos maiores para minimizar a energia interfacial total do sistema [29,31].

Na condição de 5 h, o d_0 resulta relativamente elevado devido à ativação mecânica insuficiente, levando a uma microestrutura final mais grosseira, mesmo que a taxa efetiva de engrossamento seja inferior à observada na condição de 15h [37].

À medida que o tempo de moagem aumenta, a maior ativação mecânica modifica esse equilíbrio. Em condições de ativação excessiva, como observado para 15 h, o aumento da área superficial e da energia armazenada no pó eleva a força motriz termodinâmica para a dissolução dos carbonetos. Nesse caso, essa contribuição passa a superar o efeito estabilizador proporcionado pela adição de TaC, resultando em um amadurecimento dos grãos mais acelerado.

3.1.4 Dureza, densidade e porosidade

A Tabela 2 apresenta o tamanho médio de grão, a microdureza, a densidade relativa, a porosidade aparente (ISO 4505) e o teor de ligante (12 vol.%) dos cermetos NbC5TaC5, NbC5TaC10 e NbC5TaC15.

De acordo com a padronização da ISO 4505, as classificações de porosidade aparente A02–A04B00C00 obtidas para os cermetos NbC–TaC indicam uma microestrutura altamente densa, com apenas uma fração mínima de poros finos (Tipo A), ausência completa de poros de tamanho médio (Tipo B) e inexistência de carbono livre (Tipo C) [38]. Essa classificação confirma tanto a efetiva densificação quanto o rigoroso controle do balanço de carbono durante a sinterização, bem como o adequado controle do teor de carbono (grafite) na etapa de síntese dos cermetos.

A ausência de porosidade do tipo B sugere que a coalescência de poros foi eficientemente suprimida, enquanto os baixos níveis A02–A06 (≈0,02–0,08 vol.%) refletem apenas poros finos residuais típicos de materiais duros bem sinterizados.

Mais importante ainda, a classificação C00 demonstra a ausência de carbono livre ou de outras fases ricas em carbono. Em sistemas NbC–TaC, desvios na estequiometria de carbono geralmente levam à precipitação de grafite (excesso de carbono) ou à formação de fases frágeis do tipo η (deficiência de carbono), ambas prejudiciais ao desempenho mecânico [39]. A ausência de características do Tipo C indica que o teor de 12 vol.% de ligante, combinado com adequado controle de carbono, manteve a estabilidade termodinâmica das fases de carboneto e evitou segregação de carbono.

Os valores de densidade relativa (96–100%) obtidos neste trabalho indicam um processo de densificação eficiente, consistente com a literatura para cermetos à base de WC e NbC processados por metalurgia do pó ou rotas avançadas de consolidação [1,40]. Altos níveis de densificação são essenciais para minimizar a porosidade residual e maximizar o desempenho mecânico, especialmente dureza e resistência [1].

É importante destacar que valores de densidade relativa ligeiramente acima de 100%, quando observados, não são fisicamente realistas, estando diretamente relacionados ao método de cálculo [11,27]. A densidade relativa é comumente estimada pela regra das misturas e com base na norma ASTM B962-13 para determinação da densidade teórica [27].

Em relação ao desempenho mecânico do material, os valores de dureza medidos situam-se dentro da faixa típica reportada para cermetos à base de NbC contendo ligantes metálicos [1,40,41].

A literatura mostra que a dureza nesses sistemas é fortemente influenciada pela fração de ligante, pelo tamanho de grão e pelo nível de porosidade. Como a porosidade atua como concentrador de tensões e reduz a área efetiva de suporte de carga, a quase total densificação alcançada neste estudo explica os valores relativamente elevados de dureza, em concordância com trabalhos anteriores [40,41].

Conclusão

A moagem de alta energia (MAE) mostrou-se uma rota eficaz para ajustar a evolução estrutural e microestrutural de cermetos NbC–Fe–Ni–C contendo 5% em peso de TaC. A moagem de alta energia promoveu o refinamento progressivo do cristalito, aumento da distorção de rede e maior homogeneização das fases. Os resultados de DRX revelaram alargamento sistemático dos picos com o aumento do tempo de moagem, atingindo um tamanho mínimo de cristalito de 29,78 nm após 15 h. Os deslocamentos de pico observados são atribuídos à introdução de defeitos e microdeformações geradas pela deformação plástica severa durante a moagem.

A adição de TaC intensificou o mecanismo de fragmentação devido à sua maior densidade e eficiência de impacto, acelerando a quebra das partículas e promovendo uma distribuição mais fina dos carbonetos. Em vez de formar uma solução sólida, o sistema evoluiu para uma microestrutura composta por carbonetos de TaC dispersos na matriz de NbC. Essa dispersão melhorou a homogeneização dos pós antes da sinterização e contribuiu para maior estabilidade e uniformidade microestrutural, conforme evidenciado pelas análises de MEV/EDS.

Após a sinterização por fase líquida, todas as composições apresentaram microestruturas densas típicas de cermetos, caracterizadas por grãos angulares da matriz de NbC com carbonetos de TaC dispersos e uma fase ligante contínua de Fe–Ni distribuída ao longo das interfaces dos carbonetos. Não foram detectadas fases secundárias deletérias nem carbono livre, confirmando o adequado controle de carbono e a estabilidade de fases nas condições de processamento adotadas.

O tempo de moagem influenciou fortemente o tamanho final de grão. Embora a moagem por 15 h tenha produzido o maior refinamento do pó, o excesso de energia de deformação armazenada intensificou a difusão e as cinéticas de dissolução–reprecipitação durante a sinterização, levando a crescimento exagerado de grão (9,72

µm). Por outro lado, a moagem por 5 h resultou em refinamento insuficiente e em microestrutura relativamente mais grosseira (6,92 µm).

Um equilíbrio ideal entre refinamento e engrossamento controlado foi alcançado com 10 h de moagem, resultando na distribuição mais fina e homogênea de grãos da matriz de NbC (4,95 µm), densificação total (100% de densidade relativa), porosidade mínima (ISO A02) e elevada dureza (1209,7 kgf/mm^2) com baixo desvio padrão (0,4).

Referências

Hübler D, Gradt T (2022) Effect of different binders and secondary carbides on NbC cermets. Forsch Ingenieurwes 86(2):197–211

Pierson HO (1996) Handbook of refractory carbides & nitrides: properties, characteristics, processing and applications. William Andrew, Norwich

Exner HE (1979) Physical and chemical nature of cemented carbides. Int Met Rev 24:149–173

Schubert WD, Neumeister H, Kinger G, Lux B (1998) Hardness to toughness relationship of fine-grained WC-Co hardmetals. Int J Refract Met Hard Mater 16:133–142

Shabalin I (2019) Ultra-high temperature materials II. Refractory Carbides I (Ta, Hf, Nb and Zr Carbides), vol 2. Springer Nature, Berlin

Acchar W, Zollfrank C, Greil P (2004) Microstructure and mechanical properties of WC-Co reinforced with NbC. Mater Res 7:445–450

Labonne M (2020) Sintering behavior and microstructural evolution of NbC-Ni cemented carbides. PhD Thesis, Université Grenoble Alpes

WHO-IARC (2006) Cobalt in hard metals and cobalt sulfate... Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, vol 86. / Program NT (2014) Technical report 581 on the toxicology studies of cobalt metal

Ortner HM, Ettmayer P, Kolaska H (2014) The history of the technological progress of hardmetals. Int J Refract Met Hard Mater 44:148–159. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.07.014

Peng Y, Miao H, Peng Z (2013) Development of TiCN-based cermets: mechanical properties and wear mechanism. Int J Refract Met Hard Mater 39:78–89. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.07.001

De Paula CHR et al (2025) Effect of carbon content on the microstructure and properties of NbC-Fe cermets. Int J Refract Met Hard Mater 128:107026

Esteban PG, Gordo E (2006) Development of Fe-NbC cermet from powder obtained by self-propagating high temperature synthesis

Huang SG et al NbC-Ni based cermets: phase diagrams, microstructure and mechanical properties. Int J Refract Met Hard Mater

Wu J, Zhu W, Yu W, Ma H, Shao Y Effect of TiC additions on the microstructure, mechanical and tribological properties of NbC-CoCrFeNiMn high entropy alloys cermets. Int J

Huang SG, Vleugels J, Mohrbacher H, Woydt M (2017) Microstructure and tribological performance of NbC-Ni cermets modified by VC and Mo2C. Int J Refract Met Hard Mater 66:188–197. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.03.012

Warren R, Waldron MB (1972) Microstructural development during liquid-phase sintering of cemented carbides. 1. Wettability and grain contact. Powder Metall 15(30):166–201

Koroghli M, Alimirzaloo V, Mohammadzadeh H et al (2022) Sintering behavior of WC-Co with TiC, VC and (Ta, Nb)C additives: microstructural and mechanical characteristics. J Materi Eng Perform 31:814–824. https://doi.org/10.1007/s11665-021-06209-x

Huang K-T, Chang S-H, Huang Y-W, Liang C, Li C-L (2023) Effect of TaC powder addition on the microstructure and mechanical properties of Ti–Nb–Mn alloy via vacuum sintering process. Mater Trans 64(12):2714–2721. https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2023108

Suryanarayana C (2001) Mechanical alloying and milling. Prog Mater Sci 46(1–2):1–184

Sha JJ et al (2014) Fabrication and microstructure of CNTs activated sintered W-Nb alloys. J Alloys Compd 587:290–295

Malewar R et al (2007) On sinterability of nanostructured W produced by high-energy ball milling. J Mater Res 22(5):1200–1206

Câmara NT et al (2021) Impact of the SiC addition on the morphological... properties of Cu-SiC composite powders. Adv Powder Technol 32(8):2950–2961

Kurlov AS, Gusev AI (2014) High-energy milling of nonstoichiometric carbides: effect of nonstoichiometry on particle size of nanopowders. J Alloys Compd 582:108–118

Silva MCL et al (2022) Consolidation and mechanical properties of WC-Al2O3 composite prepared via high energy ball milling and spark plasma sintering. Ceram Int 48

Basit A et al (2025) Processing route effects on NbC-Fe-Ni cermets: improving mechanical properties via mechanical alloying. Int J Refract Met Hard Mater:107372

German RM (1984) Powder metallurgy science

ASTM B962-13 (2013) Standard test methods for density of compacted or sintered powder metallurgy (PM) products using Archimedes principle

Basit A, Anwar F, Ali S, Umer MA, Shahbaz T, Ud Din E, Mubashar A (2024) Fe-Ni binder modified NbC cermets: a cost-effective solution with superior mechanical properties. Ceram Int 50(22):47768–47779. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2024.09.121

German RM, Suri P, Park SJ (2009) Liquid phase sintering. J Mater Sci 44(1):1–39

Huang SG et al (2018) NbC grain growth control and mechanical properties of Ni bonded NbC cermets prepared by vacuum liquid phase sintering. Int J Refract Met Hard Mater 72:63–70

Liu J, German RM (2001) Rearrangement densification in liquid-phase sintering. Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci 32(12):3125–3131

Zhou X, Wang R, Li C, Wang X, Wang K, Wang Q (2020) Effect of high-energy ball milling on the microstructure and properties of ultrafine gradient cemented carbides. Int J Appl Ceram Technol 17(5):2298–2306. https://doi.org/10.1111/IJAC.13551

Wittmann B, Schubert WD, Lux B (2002) WC grain growth and grain growth inhibition in nickel and iron binder hardmetals. Int J Refract Met Hard Mater 20(1):51–60. https://doi.org/10.1016/S0263-4368(01)00070-1

Roulon Z, Missiaen JM, Lay S (2020) Carbide grain growth in cemented carbides sintered with alternative binders. Int J Refract Met Hard Mater 86:105088. https://doi.org/10.1016/J.IJRMHM.2019.105088

Oh K-S, Jun J-Y, Kim D-Y, Hwang NM (2000) Shape dependence of the coarsening behavior of niobium carbide grains dispersed in a liquid iron matrix. J Am Ceram Soc 83(12):3117–3120. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01691.x

Huang SG, Vleugels J, Mohrbacher H, Woydt M (2014) Development of NbC-based hardmetals: influence of secondary carbide addition and metal binder. In: Euro PM 2014 Congress and Exhibition Proceedings

Voorhees, P. W., and M. E. Glicksman. "Ostwald ripening during liquid phase sintering—Effect of volume fraction on coarsening kinetics." Metallurgical and Materials Transactions A 15.6 (1984): 1081-1088.

International Organization for Standardization (1978) Hardmetals — metallographic determination of porosity and uncombined carbon. ISO Standard No. 4505:1978

Demirskyi D et al (2022) Consolidation and high-temperature properties of ceramics in the TaC–NbC system. J Am Ceram Soc 105(12):7567–7581

Miranda, Fabio, et al. "Additive manufacturing of tungsten carbide (WC)-based cemented carbides and niobium carbide (NbC)-based cermets with high binder content via laser powder bed fusion." Metals 14.12 (2024): 1333.

BASIT, Abdul; ALI, Sadaqat; UMER, Malik Adeel; ANWAR, Furqan. Processing route effects on NbC-Fe-Ni cermets: Improving mechanical properties via mechanical alloying. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 133, p. 107372, 2025. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2025.107372.

Anexos



Fig 1: Diagrama de fases de NbC-FeNi em função da quantidade de Carbono (wt.%).



Tabela 1. Composição das amostras de cermeto NbC-Fe-Ni-TaC-C fabricadas por moagem de alta energia (HEM) durante 5; 7,5; 10; 12,5 e 15 h.



Fig 2 : Resumo gráfico do processamento feito no presente trabalho.



Fig. 3. Padrões de DRX dos cermetos NbC–5TaC5, NbC5TaC10 e NbC5TaC15. (a) Padrões de difração com reflexões de NbC (◆) e FeNi (●); a região destacada é ampliada em (b).(c) Evolução do parâmetro de rede do NbC em função do tempo de moagem.



Fig 4. Micrografias (MEV–SE) dos cermetos NbC–Fe–Ni–5%TaC sinterizados a partir de pós submetidos a diferentes tempos de moagem: (a) NbC5TaC5, (b) NbC5TaC10 e (c) NbC5TaC15.



Fig 5. Distribuições do tamanho de grão dos cermetos NbC–Ni–Fe–TaC: (a) NbC5TaC5, (b) NbC5TaC10 e (c) NbC5TaC15. O tamanho médio de grão (M) e o desvio-padrão (σ) obtidos a partir da distribuição lognormal são indicados em cada gráfico.



Fig 6. Distribuições do tamanho de grão dos cermetos NbC–Ni–Fe–TaC: (a) NbC5TaC5, (b) NbC5TaC10 e (c) NbC5TaC15. Coluna central: são apresentados os mapas sobrepostos de distribuição dos elementos obtidos. Coluna da direita: mapas individuais de EDS.

CÓDIGO: ET0680

AUTOR: INGRID RAISSA DE SOUZA SOARES

COAUTOR: MARIA JOSE SANTOS LIMA

COAUTOR: UILAME UMBELINO GOMES

ORIENTADOR: RUBENS MARIBONDO DO NASCIMENTO

TÍTULO: SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE TUNGSTATO BIMETÁLICO DE NÍQUEL E COBALTO (NiCoWO4) UTILIZANDO BIOPOLÍMEROS NATURAIS (CHIA E GLUCOMANANA)

Resumo

Os tungstatos bimetálicos destacam-se por sua estabilidade estrutural e propriedades eletrocatalíticas aplicadas à conversão de energia. Neste trabalho, nanopartículas de NiCoWO4 foram sintetizadas por rota sol-gel verde, utilizando paratungstato de amônio (APT) obtido da scheelita potiguar e nitratos de Ni e Co, com chia (Salvia hispanica L.) e glucomanana (Amorphophallus konjac) como biopolímeros naturais. Os géis foram secos a 150 C e calcinados a 500, 550 e 650 C. As amostras foram caracterizadas por DRX, FTIR, Raman e MEV. O DRX mostrou que o aumento da temperatura favoreceu a cristalização da estrutura monoclínica tipo wolframita, sendo obtida a fase sem evidências de fases secundárias a 650 C para ambos os biopolímeros. O Raman apresentou banda intensa em 880 cm-1, atribuída ao estiramento simétrico W-O nos octaedros [WO6], enquanto o FTIR confirmou vibrações W-O, O-W-O e M-O-W. O NiCoWO4-Gluco-650 C apresentou, para OER, sobrepotencial de 334 mV a 10 mA cm-2, inclinação de Tafel de 47,26 mV dec-1, Cdl de 1,9 mF cm-2 e Rct de 25,35 ohms. Os resultados demonstram o potencial da rota proposta para obtenção sustentável de NiCoWO4 com propriedades estruturais e eletrocatalíticas promissoras.

Palavras-chave: Tungstato misto, síntese verde, sol-gel, biopolímeros, eletrocatálise.

TITLE: GREEN SYNTHESIS OF NICKEL AND COBALT BIMETALLIC TUNGSTATE NANOPARTICLES (NiCoWO4) USING NATURAL BIOPOLYMERS (CHIA AND GLUCOMANAN)

Abstract

Bimetallic tungstates stand out due to their structural stability and electrocatalytic properties for energy conversion applications. In this work, NiCoWO4 nanoparticles were synthesized through a green sol-gel route using ammonium paratungstate (APT) obtained from scheelite from Rio Grande do Norte, Brazil, and Ni and Co nitrates as metal precursors, with chia (Salvia hispanica L.) and glucomannan (Amorphophallus konjac) as natural biopolymers. The gels were dried at 150 C and calcined at 500, 550, and 650 C. The samples were characterized by XRD, FTIR, Raman spectroscopy, and

SEM. XRD results showed that increasing the calcination temperature favored the crystallization of the monoclinic wolframite-type structure, with no detectable secondary phases at 650 C for both biopolymers. Raman spectroscopy exhibited an intense band at 880 cm-1, assigned to the symmetric stretching of W-O bonds in [WO6] octahedra, while FTIR confirmed W-O, O-W-O, and M-O-W vibrations. For the OER, NiCoWO4-Gluco-650 C exhibited an overpotential of 334 mV at 10 mA cm-2, a Tafel slope of 47.26 mV dec-1, a Cdl of 1.9 mF cm-2, and an Rct of 25.35 ohms. These results demonstrate the potential of the proposed route for the sustainable production of NiCoWO4 with promising structural and electrocatalytic properties.

Keywords: Mixed tungstate, green synthesis, sol-gel, biopolymers.

Introdução

A dependência mundial de combustíveis fósseis e o aumento contínuo das emissões de gases de efeito estufa configuram os maiores desafios ambientais da atualidade [1]. Nesse contexto, a transição para fontes renováveis, como solar e eólica, tornou-se estratégica, embora sua intermitência ainda limite o fornecimento contínuo de energia [2,3]. O hidrogênio verde surge como vetor energético promissor por apresentar elevada densidade energética gravimétrica (120-142 MJ kg-1) e por possibilitar geração de energia sem emissão direta de carbono. Sua produção por eletrólise da água envolve as reações de evolução de hidrogênio (HER) e oxigênio (OER), sendo a OER considerada o principal gargalo cinético do processo [1,4]. A OER envolve uma sequência complexa de transferência de quatro elétrons e formação de intermediários oxigenados, resultando em elevada barreira de ativação e necessidade de sobrepotenciais além do limite termodinâmico de 1,23 V [6,7]. Logo, o desenvolvimento de eletrocatalisadores que reduzam essas perdas é fundamental para aumentar a eficiência da eletrólise [8]. Embora óxidos de metais nobres, como IrO2 e RuO2, apresentem alta atividade para OER, seu alto custo e baixa abundância restringem seu uso em larga escala, estimulando a busca por materiais baseados em metais de transição abundantes, como Ni, Co e W [1,6]. Entre esses materiais, os tungstatos exibem alta estabilidade química e estrutural, além de flexibilidade composicional. Tungstatos com cátions de menor raio, como Ni2+ e Co2+, cristalizam na estrutura monoclínica tipo wolframita, grupo espacial P2/c, formada por octaedros [MO6] e [WO6] interconectados [11,12,13]. Em sistemas bimetálicos Ni-Co, a coexistência de centros com diferentes estados de oxidação promove redistribuição eletrônica e modifica a interação entre o catalisador e os intermediários *OH, *O e *OOH na OER [14]. Essa cooperação eletrônica interfacial na volframita favorece a transferência de carga e acelera a cinética, tornando o NiCoWO4 excelente para conversão de energia. Além da composição química, a rota de síntese exerce forte influência na pureza de fase, morfologia e propriedades eletroquímicas. Rotas cerâmicas no estado sólido exigem altas temperaturas (> 1000 C), implicando alto consumo energético e menor controle granulométrico [16,17]. Em contrapartida, o método sol-gel apresenta a vantagem de promover a mistura dos precursores em escala molecular, viabilizando a formação de fases cristalinas em temperaturas consideravelmente inferiores. Para tornar o método sol-gel mais sustentável, a substituição de quelantes sintéticos por biopolímeros naturais mostra-se promissora. A mucilagem da chia (Salvia hispanica L.) possui matriz polissacarídica rica em grupos hidroxila e carboxila. Tais grupos coordenam os íons metálicos, otimizando sua dispersão e estabilizando a rede do gel [18,19]. De modo similar, a glucomanana (Amorphophallus konjac), um biopolímero hidrossolúvel de alto poder de gelificação, atua por impedimento estérico. Sua aplicação nessas sínteses verdes confere

grande estabilização térmica, impedindo o crescimento cristalino excessivo e controlando a aglomeração das nanopartículas formadas [20,21,22,23]. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma rota sol-gel verde para a obtenção do tungstato bimetálico NiCoWO4 com estrutura monoclínica do tipo wolframita, utilizando chia e glucomanana como biopolímeros naturais auxiliares. Buscou-se avaliar a influência desses agentes complexantes e da temperatura de calcinação sobre a formação da fase cristalina, bem como correlacionar as características estruturais, vibracionais e morfológicas dos materiais com seu desempenho eletrocatalítico na OER. A abordagem estabelecida concilia a priorização de precursores renováveis e a redução do aporte energético com a obtenção de catalisadores competitivos, unindo alto desempenho tecnológico aos pilares da Química Verde.

Metodologia

A obtenção das nanopartículas do sistema NiCoWO4 foi realizada utilizando paratungstato de amônio tetrahidratado (APT, (NH4)10[H2W12O42].4H2O) como fonte de tungstênio, obtido a partir do processamento de concentrado do mineral scheelita no âmbito do projeto PDI-MINERAIS ESTRATÉGICOS/CNPq, Processo n 407903/2022-4. Como precursores de níquel e cobalto, foram empregados nitrato de níquel hexahidratado [Ni(NO3)2.6H2O, >= 99%, Dinâmica, Brasil] e nitrato de cobalto hexahidratado [Co(NO3)2.6H2O, >= 99,9%, Dinâmica, Brasil], respectivamente. O APT e os reagentes utilizados na síntese foram disponibilizados pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais (LMCME/UFRN). Como biopolímeros naturais auxiliares da rota sol-gel, foram utilizadas sementes de chia (Salvia hispanica L.), adquiridas no comércio local, e glucomanana de konjac em pó, proveniente de Amorphophallus konjac, também adquirida comercialmente. Esses biopolímeros foram empregados como agentes naturais de formação e estabilização da matriz orgânica durante o processo sol-gel, favorecendo a dispersão e a interação dos precursores metálicos ao longo da formação do gel. Para a preparação dos eletrodos e realização das medidas eletroquímicas, foram utilizados Nafion 5%, álcool etílico e espuma de níquel (Ni, 99,8%, porosidade > 95%, QiJing Ltd., China) como substrato condutor para a deposição do material eletrocatalítico. Os demais reagentes empregados na preparação da solução eletrolítica foram de grau analítico [20,24]. A síntese das nanopartículas do sistema NiCoWO4 foi realizada pelo método sol-gel utilizando o gel retirado das sementes de chia e glucomanana, Para ambas as sínteses, foram utilizados paratungstato de amônio tetrahidratado (APT) como fonte de tungstênio e nitratos de níquel e cobalto como precursores catiônicos. Inicialmente, 4,252 g de APT foram dissolvidos em 100 mL de água destilada, sob agitação constante a 70 C durante 30 min. Simultaneamente, 4,75 g de nitrato de níquel hexahidratado e 4,75 g de nitrato de cobalto hexahidratado foram dissolvidos em 50 mL de água destilada a 60 C, formando uma solução homogênea contendo os precursores de Ni2+ e Co2+. Para a rota assistida por chia, o gel foi obtido utilizando 2,006 g de sementes de chia, adicionadas a 50 mL de água destilada. A suspensão foi mantida sob agitação a 50 C durante 50 min, favorecendo a hidratação das sementes e a liberação dos componentes polissacarídicos responsáveis pela formação do gel. Após essa etapa, o sistema foi filtrado para remoção das sementes, e o gel obtido foi adicionado à mistura contendo os precursores de Ni, Co e W. Na síntese usando a glucomanana em substituição à chia como biopolímero auxiliar da síntese. 1 grama de glucomanana foi dispersa em 50 mL de água destilada até a

formação de um gel homogêneo, sendo posteriormente incorporada à solução contendo os precursores metálicos e mantida sob agitação constante por 2 horas. Dessa forma, tanto o gel da chia quanto o gel da glucomanana foram avaliados como alternativas naturais aos agentes orgânicos sintéticos convencionalmente utilizados em rotas químicas de síntese. Após a completa homogeneização dos componentes, os sistemas contendo chia e glucomanana foram submetidos separadamente à secagem a 150 C durante 3 h, promovendo a remoção do excesso de solvente e a formação dos respectivos precursores sólidos. Os materiais obtidos foram posteriormente macerados em cadinho de ágata até a obtenção de pós finos. Para avaliar a influência da temperatura sobre a evolução estrutural, os pós foram submetidos a tratamentos térmicos a 500, 550 e 650 C por 4 h, com taxa de aquecimento de 5 C min-1. A caracterização físico-química dos materiais foi realizada com o objetivo de avaliar a influência do biopolímero e da temperatura de calcinação sobre a estrutura e a morfologia do NiCoWO4. A identificação das fases cristalinas foi realizada por Difração de Raios X (DRX) utilizando radiação Cu-Kalpha (lambda = 1,5418 A). A análise estrutural foi complementada por espectroscopia Raman e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), utilizadas para identificar os modos vibracionais associados principalmente às ligações W-O, O-W-O e M-O-W (M = Ni, Co). A morfologia superficial e o estado de agregação das partículas foram avaliados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/FE-SEM). A atividade eletrocatalítica dos materiais foi avaliada em uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos, utilizando platina como contra-eletrodo, Ag/AgCl como eletrodo de referência e espuma de níquel como substrato para o eletrodo de trabalho. A tinta catalítica foi preparada dispersando-se 5 mg do material ativo em álcool isopropílico e solução de Nafion 5%, sendo posteriormente depositada sobre a espuma de níquel. As medidas eletroquímicas foram realizadas em solução de KOH 1 mol L-1, empregando voltametria de varredura linear (LSV), voltametria cíclica (CV), análise de Tafel e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) para investigar a atividade, a cinética de reação e os processos de transferência de carga associados à reação de evolução de oxigênio (OER).

Resultados e Discussões

A obtenção das nanopartículas do sistema NiCoWO4 foi realizada utilizando paratungstato de amônio tetrahidratado (APT, (NH4)10[H2W12O42].4H2O) como fonte de tungstênio, obtido a partir do processamento de concentrado do mineral scheelita no âmbito do projeto PDI-MINERAIS ESTRATÉGICOS/CNPq, Processo n 407903/2022-4. Como precursores de níquel e cobalto, foram empregados nitrato de níquel hexahidratado [Ni(NO3)2.6H2O, >= 99%, Dinâmica, Brasil] e nitrato de cobalto hexahidratado [Co(NO3)2.6H2O, >= 99,9%, Dinâmica, Brasil], respectivamente. O APT e os reagentes utilizados na síntese foram disponibilizados pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais (LMCME/UFRN). Como biopolímeros naturais auxiliares da rota sol-gel, foram utilizadas sementes de chia (Salvia hispanica L.), adquiridas no comércio local, e glucomanana de konjac em pó, proveniente de Amorphophallus konjac, também adquirida comercialmente. Esses biopolímeros foram empregados como agentes naturais de formação e estabilização da matriz orgânica durante o processo sol-gel, favorecendo a dispersão e a interação dos precursores metálicos ao longo da formação do gel. Para a preparação dos eletrodos e realização das medidas eletroquímicas, foram utilizados Nafion 5%, álcool etílico e espuma de níquel (Ni, 99,8%, porosidade > 95%, QiJing Ltd., China) como substrato condutor para a

deposição do material eletrocatalítico. Os demais reagentes empregados na preparação da solução eletrolítica foram de grau analítico [20,24]. A síntese das nanopartículas do sistema NiCoWO4 foi realizada pelo método sol-gel utilizando o gel retirado das sementes de chia e glucomanana. Para ambas as sínteses, foram utilizados paratungstato de amônio tetrahidratado (APT) como fonte de tungstênio e nitratos de níquel e cobalto como precursores catiônicos. Inicialmente, 4,252 g de APT foram dissolvidos em 100 mL de água destilada, sob agitação constante a 70 C durante 30 min. Simultaneamente, 4,75 g de nitrato de níquel hexahidratado e 4,75 g de nitrato de cobalto hexahidratado foram dissolvidos em 50 mL de água destilada a 60 C, formando uma solução homogênea contendo os precursores de Ni2+ e Co2+. Para a rota assistida por chia, o gel foi obtido utilizando 2,006 g de sementes de chia, adicionadas a 50 mL de água destilada. A suspensão foi mantida sob agitação a 50 C durante 50 min, favorecendo a hidratação das sementes e a liberação dos componentes polissacarídicos responsáveis pela formação do gel. Após essa etapa, o sistema foi filtrado para remoção das sementes, e o gel obtido foi adicionado à mistura contendo os precursores de Ni, Co e W. Na síntese usando a glucomanana em substituição à chia como biopolímero auxiliar da síntese, 1 grama de glucomanana foi dispersa em 50 mL de água destilada até a formação de um gel homogêneo, sendo posteriormente incorporada à solução contendo os precursores metálicos e mantida sob agitação constante por 2 horas. Dessa forma, tanto o gel da chia quanto o gel da glucomanana foram avaliados como alternativas naturais aos agentes orgânicos sintéticos convencionalmente utilizados em rotas químicas de síntese. Após a completa homogeneização dos componentes, os sistemas contendo chia e glucomanana foram submetidos separadamente à secagem a 150 C durante 3 h, promovendo a remoção do excesso de solvente e a formação dos respectivos precursores sólidos. Os materiais obtidos foram posteriormente macerados em cadinho de ágata até a obtenção de pós finos. Para avaliar a influência da temperatura sobre a evolução estrutural, os pós foram submetidos a tratamentos térmicos a 500, 550 e 650 C por 4 h, com taxa de aquecimento de 5 C min-1. A caracterização físico-química dos materiais foi realizada com o objetivo de avaliar a influência do biopolímero e da temperatura de calcinação sobre a estrutura e a morfologia do NiCoWO4. A identificação das fases cristalinas foi realizada por Difração de Raios X (DRX) utilizando radiação Cu-Kalpha (lambda = 1,5418 A). A análise estrutural foi complementada por espectroscopia Raman e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), utilizadas para identificar os modos vibracionais associados principalmente às ligações W-O, O-W-O e M-O-W (M = Ni, Co). A morfologia superficial e o estado de agregação das partículas foram avaliados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/FE-SEM). A atividade eletrocatalítica dos materiais foi avaliada em uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos, utilizando platina como contra-eletrodo, Ag/AgCl como eletrodo de referência e espuma de níquel como substrato para o eletrodo de trabalho. A tinta catalítica foi preparada dispersando-se 5 mg do material ativo em álcool isopropílico e solução de Nafion 5%, sendo posteriormente depositada sobre a espuma de níquel. As medidas eletroquímicas foram realizadas em solução de KOH 1 mol L-1, empregando voltametria de varredura linear (LSV), voltametria cíclica (CV), análise de Tafel e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) para investigar a atividade, a cinética de reação e os processos de transferência de carga associados à reação de evolução de oxigênio (OER).

Conclusão

A síntese verde do tungstato bimetálico NiCo-WO4 empregando chia (Salvia hispanica L.) e glucomanana como agentes complexantes mostrou-se eficiente para a obtenção da estrutura do tipo wolframita. Os resultados de DRX evidenciaram que, a 500 e 550 C, ainda são observadas fases secundárias associadas principalmente ao WO3, enquanto o tratamento térmico a 650 C favoreceu a consolidação da fase monoclínica, sem evidências de fases secundárias detectáveis, independentemente do agente complexante utilizado. As análises de Raman e FTIR corroboraram os resultados estruturais, confirmando as vibrações características das unidades octaédricas [WO6] e da rede W-O-(Ni,Co). As micrografias de MEV demonstraram que a natureza do agente complexante influencia a morfologia das partículas, enquanto os mapas elementares por EDS indicaram distribuição de W, O, Ni e Co nas regiões analisadas. A amostra NiCo-WO4-Gluco-650 C apresentou desempenho promissor para a reação de evolução de oxigênio, com sobrepotencial de 334 mV a 10 mA cm-2 e inclinação de Tafel de 47,26 mV dec-1. Os resultados de Cdl e EIS complementaram essa avaliação, indicando superfície eletroquimicamente acessível e transferência de carga compatível com a atividade observada. Esse comportamento pode estar relacionado à combinação entre o ordenamento estrutural da fase tungstato, as interações no sistema Ni-Co-W-O e a participação dos centros metálicos nos processos redox superficiais envolvidos na OER. De modo geral, os resultados demonstram que chia e glucomanana constituem agentes complexantes naturais adequados para a síntese de tungstatos bimetálicos, possibilitando a formação da estrutura desejada a 650 C. A metodologia proposta associa o uso de matérias-primas renováveis, condições térmicas relativamente brandas e desempenho eletrocatalítico relevante, evidenciando o potencial do NiCo-WO4 obtido por síntese verde para aplicações em processos sustentáveis de conversão de energia.

Referências

[1] EMAM, A. S. et al. A review on recent trends, challenges, and innovations in alkaline water electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy, v. 64, p. 599-625, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.238.
[2] YU, M.; BUDIYANTO, E.; TUYSUZ, H. Principles of Water Electrolysis and Recent Progress for OER. Angewandte Chemie, v. 134, 2022. DOI: 10.1002/ange.202103824.
[3] DINCER, I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 4, p. 157-175, 2000. DOI: 10.1016/S1364-0321(99)00011-8.
[4] FAREED, Rashid et al. Exploiting synergistic effects of graphitic carbon nitride-supported samarium selenide (Sm2Se3/g -C3N4) nanocomposite for efficient OER/HER in an alkaline medium. Materials Chemistry and Physics, v. 337, p. 130609, 2025.
[5] BAGWADE, P. P. Reduced Graphene Oxide - Cobalt Tungsten Oxide Composite Thin Film for Supercapacitor and Oxygen Evolution Reaction. Tese (Doutorado em Fisica) - Centre for Interdisciplinary Research, D. Y. Patil Education Society, Kolhapur, India, 2022.
[6] YOU, B.; SUN, Y. Innovative Strategies for Electrocatalytic Water Splitting. Accounts of Chemical Research, v. 51, p. 1571-1580, 2018. DOI: 10.1021/acs.accounts.8b00002.

[7] TAHIR, M. et al. Electrocatalytic oxygen evolution reaction for energy conversion and storage: a comprehensive review. Nano Energy, v. 18, 2017. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.01.032.
[8] SEH, Z. W. et al. Combining theory and experiment in electrocatalysis: Insights into materials design. Science, v. 355, n. 6321, p. eaad4998, 2017. DOI: 10.1126/science.aad4998.
[9] SIVANANTHAM, A. et al. Hierarchical NiCo2S4 nanowire arrays: an efficient and durable bifunctional electrocatalyst. Advanced Functional Materials, v. 26, n. 26, p. 4661-4672, 2016. DOI: 10.1002/adfm.201600566.
[10] MCCORRY, C. C. et al. Benchmarking heterogeneous electrocatalysts for the oxygen evolution reaction. Journal of the American Chemical Society, v. 135, p. 16977-16987, 2013. DOI: 10.1021/ja407115u.
[11] SRIRAPU, V. K. V. P. et al. Nanosized CoWO4 and NiWO4 as efficient oxygen-evolving electrocatalysts. Electrochimica Acta, v. 209, p. 75-84, 2016. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.05.025.
[12] GONZALEZ-CORTES, S. L. et al. Relevance of the Co1-xNixWO4 wolframite-type mixed oxide compositions. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, v. 235, p. 148-159, 2005. DOI: 10.1016/j.molcata.2005.03.018.
[13] TIMOSHENKO, J. et al. Analysis of extended x-ray absorption fine structure data from copper tungstate. Physica Scripta, v. 89, p. 044006, 2014. DOI: 10.1088/0031-8949/89/04/044006.
[14] WAN, Z. et al. Interface engineering of NiS/NiCo2S4 heterostructure with charge redistribution for boosting overall water splitting. Journal of Colloid and Interface Science, v. 653, p. 795-806, 2024. DOI: 10.1016/j.jcis.2023.09.117.
[15] SARKAR, A. et al. High-entropy oxides: Fundamental aspects and electrochemical properties. Advanced Materials, v. 31, n. 26, p. 1806236, 2019. DOI: 10.1002/adma.201806236.
[16] WANG, Y. et al. High-Entropy Perovskites for Energy Conversion and Storage: Design, Synthesis, and Potential Applications. Small Methods, v. 7, 2023. DOI: 10.1002/smtd.202201138.
[17] PIRIDIGLIOZZI, L. et al. Design, synthesis and formation mechanism of a novel entropy-stabilized perovskite oxide derived from barium cerate/zirconate. Journal of the European Ceramic Society, v. 44, p. 2223-2232, 2024. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2023.11.006.
[18] NAGARAJU, G. et al. Green approach to synthesis using Salvia hispanica powder for photocatalysis and organic catalysis. Inorganic Chemistry Communications, v. 176, 114143, 2025. DOI: 10.1016/j.inoche.2025.114143.
[19] ABED, M. A. et al. Physical properties of green-iron oxide nanoparticles synthesize with chia seeds. Chemical Data Collections, v. 44, 101013, 2023. DOI: 10.1016/j.cdc.2023.101013.
[20] ZHANG, C.; CHEN, J. D.; YANG, F. Q. Konjac glucomannan, a promising polysaccharide for OCDDS. Carbohydrate Polymers, v. 104, p. 175-181, 2014. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.12.081
[21] MU, R.-J. et al. Microencapsulation of Lactobacillus acidophilus with konjac glucomannan hydrogel. Food Hydrocolloids, v. 76, p. 42-48, 2018. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2017.07.009.
[22] SUN, Y. et al. Review of Konjac Glucomannan Structure, Properties, Gelation Mechanism, and Application in Medical Biology. Polymers, v. 15, n. 8, 1852, 2023. DOI: 10.3390/polym15081852.

[23] CHEN, J. et al. Konjac glucomannan reduced-stabilized silver nanoparticles for mono-azo and di-azo contained wastewater treatment. Inorganica Chimica Acta, v. 515, 120058, 2021. DOI: 10.1016/j.ica.2020.120058.
[24] PIMENTEL, P. M. et al. Gelatin synthesis and color properties of (La, Pr, Nd) lanthanide aluminates. Ceramics International, v. 43, p. 6592-6596, 2017. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.01.134.
[25] OLIVEIRA, Y. L. et al. Structural characterization, morphology, and optical properties of NiWO4 crystals. Journal of Molecular Structure, v. 1221, 128774, 2020. DOI: 10.1016/j.molstruc.2020.128774.
[26] RAJPUROHIT, A. S. et al. Fabrication of high energy density symmetric supercapacitor based on cobalt-nickel bimetallic tungstate nanoparticles decorated phosphorus-sulphur co-doped graphene nanosheets with extended voltage. Chemical Engineering Journal, v. 371, p. 679-692, 2019. DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.100.
[27] ZAFAR, K. et al. Quantification of tramadol and serotonin by cobalt nickel tungstate in real biological samples to evaluate the effect of analgesic drugs on neurotransmitters. Scientific Reports, v. 13, 10239, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-37053-9.
[28] SRIRAPU, V. K. V. P. et al. Nanosized CoWO4 and NiWO4 as efficient oxygen-evolving electrocatalysts. Electrochimica Acta, v. 209, p. 75-84, 2016. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.05.042.
[29] HE, G. et al. One pot synthesis of nickel foam supported self-assembly of NiWO4 and CoWO4 nanostructures that act as high performance electrochemical capacitor electrodes. Journal of Materials Chemistry A, v. 3, n. 27, p. 14272-14278, 2015. DOI: 10.1039/C5TA01598G.
[30] NADERI, H. R. et al. Decoration of nitrogen-doped reduced graphene oxide with cobalt tungstate nanoparticles for use in high-performance supercapacitors. Applied Surface Science, v. 423, p. 1025-1034, 2017. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.06.239.
[31] MANCHEVA, M. N. et al. Direct Mechanochemical Synthesis of Nanocrystalline NiWO4. The Journal of Physical Chemistry C, v. 111, n. 3, p. 1101-1104, 2007. DOI: 10.1021/jp065071k.
[32] ANJU, V. S.; HAREENDRAKRISHNAKUMAR, H.; SANDHYARANI, N. Electronic Structure Engineering of Bimetallic Wolframites: Synergistic Ni-Doped and Ag-Decorated Cobalt Tungstate Nanoparticles for Bifunctional Oxygen Electrocatalysis. ACS Applied Nano Materials, v. 9, n. 26, p. 12324-12336, 2026. DOI: 10.1021/acsanm.6c01217.
[33] SILVA, M. V. et al. Synthesis of NiMoO4 ceramics by proteic sol-gel method and investigation of their catalytic properties. Materials Chemistry and Physics, v. 262, 124301, 2021. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2021.124301.
[34] DA SILVA, M. V. et al. Influence of temperature on the structural and color properties of nickel molybdates. Materials Research Bulletin, v. 121, 110619, 2020. DOI: 10.1016/j.materresbull.2019.110619.
[35] HE, Z. et al. Monolithic-structured nickel silicide electrocatalyst for bifunctionally efficient overall water splitting. Applied Catalysis B: Environmental, v. 342, p. 123386, 2024. DOI: 10.1016/j.apcatb.2023.123386.
[36] NAN, H. et al. Inducing the cocktail effect in yolk-shell high-entropy oxides for improved electrochemical applications. Chemical Engineering Journal, v. 452, p. 139501, 2023. DOI: 10.1016/j.cej.2022.139501.
[37] NGUYEN, T. X. et al. Self-Reconstruction of High Entropy Sulfide for High-Performance OER. Advanced Functional Materials, v. 31, 2021. DOI: 10.1002/adfm.202106229.

Anexos



Figura 1. Padrões de difração de raios X do sistema NiCoWO4 sintetizado utilizando chia como agente complexante e calcinado a 500, 550 e 650 C, com comparação aos padrões de referência de NiWO4 (ICSD 016685) e WO3 (ICSD 001620).



Figura 2. Padrões de difração de raios X do sistema NiCoWO4 sintetizado utilizando Glucomanana como agente complexante e calcinado a 500, 550 e 650 C, com comparação aos padrões de referência de NiWO4 (ICSD 016685) e WO3 (ICSD 001620).



Figura 3. Micrografias de MEV do NiCo-WO4 sintetizado utilizando chia como agente complexante e calcinado a 650 C: (a,b) imagens em diferentes ampliações e (c) mapeamento elementar por EDS de W, O, Co e Ni.



Figura 4. Micrografias de MEV do NiCo-WO4 sintetizado utilizando glucomanana como agente complexante e calcinado a 650 C: (a,b) imagens em diferentes ampliações e (c) mapeamento elementar por EDS de W, O, Co e Ni.



Figura 5. Espectros FTIR do tungstato misto NiCo-WO4 sintetizado pelo método sol-gel usando chia a 650 C.



Figura 6. Espectro Raman da amostra NiCoWO4 obtida pelo método sol-gel assistido por glucomanano e calcinada a 650 C, evidenciando os modos vibracionais característicos associados à estrutura monoclínica do tipo wolframita.



Figura 7. Caracterização eletroquímica do NiCoWO4-Gluco-650 C para OER: (a) curva LSV; (b) sobrepotencial em diferentes densidades de corrente; (c-d) determinação da Cdl por voltametria cíclica; (e) curva de Tafel; e (f) espectroscopia de impedância.

CÓDIGO: ET0016
AUTOR: GABRIELLY DE JESUS PEREIRA DANTAS

ORIENTADOR: FABIANA VILLELA DA MOTTA

TÍTULO: Síntese e Caracterização de BaBiO3 pelo Método Sol-Gel e sua Aplicação Fotocatalítica

Resumo

Neste estudo, pós de BaBi(1-x)CoxO3 (com x = 0, 1, 2, 4 e 8 mol%) foram sintetizados usando o método sol-gel. As amostras foram caracterizadas por várias técnicas, incluindo difração de raios X (DRX), espalhamento Raman, espectroscopia UV-Visível, espectroscopia de fotoelétrons por raios X (XPS), espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS, Mott-Schottky) e microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (FESEM), com análise química associada por EDX.As propriedades fotocatalíticas foram avaliadas utilizando o corante azul de metileno (MB). Os resultados indicam que a dopagem com Co ocorre preferencialmente nos sítios de Bi^{3+}, levando à formação de defeitos na rede de BaBiO3. Esses defeitos aumentam significativamente a atividade fotocatalítica, resultando em aproximadamente 80% de degradação do MB em 120 minutos. A atividade fotocatalítica do BaBiO3 em relação ao corante MB mostrou um aumento de 14% na eficiência em condições de pH ácido, enquanto a amostra BBO8C apresentou 22% mais eficiência em meio neutro comparado ao ambiente ácido.O processo fotocatalítico foi principalmente conduzido por fenômenos mediados por elétrons, conforme indicado pelas reduções de 8% e 71% na atividade de BBO e BBO8C, respectivamente, após a adição de captadores de elétrons. Os achados sugerem que o BaBiO3 dopado com Co é um material promissor para o tratamento de águas residuais, demonstrando eficácia na degradação do corante azul de metileno sob diferentes condições

Palavras-chave: BaBiO3; método sol-gel; fotocatálise; azul de metileno

TITLE: Synthesis and Characterization of BaBiO3 by the Sol-Gel Method and Its Photocatalytic Application

Abstract

In this study, BaBi(1-x)CoxO3 powders (x = 0, 1, 2, 4, and 8 mol%) were synthesized using the sol-gel method. The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, UV-Vis spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), electrochemical impedance spectroscopy (EIS, Mott-Schottky), and field-emission scanning electron microscopy (FESEM) coupled with EDX analysis. The photocatalytic properties were evaluated using methylene blue (MB) dye. The results indicate that Co

doping preferentially occurs at Bi3+ sites, leading to the formation of defects in the BaBiO3 lattice. These defects significantly enhance the photocatalytic activity, resulting in approximately 80% degradation of MB after 120 min. The photocatalytic activity of BaBiO3 toward MB increased by 14% under acidic conditions, while the BBO8C sample exhibited 22% higher efficiency in neutral medium compared with acidic conditions. The photocatalytic process was mainly driven by electron-mediated phenomena. These findings suggest that Co-doped BaBiO3 is a promising material for wastewater treatment, demonstrating effective degradation of methylene blue under different environmental conditions.

Keywords: BaBiO3; sol-gel method; photocatalysis; methylene blue

Introdução

Materiais do tipo perovskita, com a fórmula geral ABX3, têm atraído considerável atenção devido à sua notável versatilidade estrutural e à possibilidade de otimizar suas propriedades físico-químicas. Nesse tipo de estrutura cristalina, o cátion A é tipicamente um íon maior, como o bário, enquanto o cátion B ocupa o centro de um octaedro formado por seis ânions no sítio X, geralmente oxigênio. Essa arquitetura tridimensional permite transporte eficiente de carga, alta estabilidade térmica e forte absorção de luz, tornando esses materiais promissores para aplicações em optoeletrônica, sensores, dispositivos fotovoltaicos e fotocatálise heterogênea. Entre os diversos sistemas de perovskita, o BaBiO3 destaca-se por sua estrutura cristalina complexa e por apresentar estados de oxidação mistos do bismuto (Bi3+/Bi5+), o que favorece uma largura de banda relativamente estreita e eficiente separação de cargas, permitindo absorção na região da luz visível. Essas características tornam o BaBiO3 uma alternativa promissora para aplicações fotocatalíticas sob luz solar, especialmente quando comparado a semicondutores tradicionais, como o TiO2. A fotocatálise heterogênea é reconhecida como uma tecnologia ambientalmente sustentável para promover reações de oxidação e redução mediadas por semicondutores sob irradiação luminosa. Durante esse processo, a geração de pares elétron-lacuna possibilita a formação de espécies reativas capazes de degradar compostos orgânicos tóxicos. Em relação aos métodos convencionais de tratamento de efluentes, a fotocatálise apresenta vantagens como menor consumo de energia, ausência de subprodutos tóxicos e possibilidade de utilização da luz natural. Com o objetivo de melhorar o desempenho fotocatalítico do BaBiO3, diferentes estratégias de modificação estrutural têm sido investigadas, sendo a dopagem uma das mais eficazes. A introdução de cobalto na estrutura do material pode alterar sua densidade eletrônica, reduzir a largura de banda e favorecer a separação e o transporte de cargas, aumentando sua eficiência fotocatalítica. Neste trabalho, foi sintetizado BaBiO3 dopado com cobalto pelo método sol-gel, e suas propriedades estruturais, ópticas, eletrônicas e fotocatalíticas foram investigadas por meio de técnicas de caracterização, como DRX, Raman, XPS, UV-Vis, FESEM/EDX e análises eletroquímicas. O desempenho fotocatalítico foi avaliado utilizando o corante azul de metileno como poluente modelo, buscando compreender a influência da dopagem com Co na eficiência do material e contribuir para o desenvolvimento de fotocatalisadores mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

Metodologia

Pós de BaBi(1-x)CoxO3 (x = 0, 1, 2, 4 e 8 mol%) foram sintetizados pelo método sol-gel utilizando nitrato de bário, nitrato de bismuto, nitrato de cobalto, ácido cítrico, etilenoglicol e água deionizada como precursores. Inicialmente, o ácido cítrico foi dissolvido em água deionizada, seguido da adição dos nitratos de bário e bismuto. A solução foi aquecida sob agitação, sendo posteriormente adicionada uma quantidade adequada de etilenoglicol. O aquecimento foi mantido até a formação de um gel, que passou por tratamento térmico a 400 °C por 2 h para remoção da matéria orgânica e calcinação a 800 °C por 4 h. As amostras dopadas foram preparadas pelo mesmo procedimento, substituindo parte do bismuto por cobalto, sendo denominadas BBO, BBO1C, BBO2C, BBO4C e BBO8C. A caracterização estrutural foi realizada por difração de raios X (DRX), com refinamento de Rietveld para determinação dos parâmetros cristalográficos. As propriedades vibracionais foram investigadas por espectroscopia Raman, enquanto a composição química superficial e os estados de oxidação foram analisados por espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS). A morfologia e a composição elementar das partículas foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (FESEM) acoplada à espectroscopia por dispersão de energia (EDX). As propriedades ópticas foram determinadas por espectroscopia UV-Vis de refletância difusa, utilizando a função de Kubelka-Munk e a metodologia de Wood e Tauc para estimativa da energia de band gap. Também foram realizadas análises eletroquímicas por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), Mott-Schottky e determinação do ponto de carga zero (PZC). Os ensaios fotocatalíticos foram conduzidos utilizando uma solução aquosa de azul de metileno (10^{-5} mol L^{-1}), empregando 50 mg de fotocatalisador em 50 mL de solução. Inicialmente, o sistema permaneceu por 30 min no escuro para estabilização da adsorção e, em seguida, foi irradiado com lâmpada halógena de 500 W. Amostras da solução foram coletadas em intervalos regulares e analisadas por espectrofotometria UV-Vis. Também foram avaliados os efeitos do pH (3, 7 e 11), os mecanismos de degradação por meio da adição de sequestradores de carga e a estabilidade do material em testes de reutilização ao longo de quatro ciclos consecutivos.

Resultados e Discussões

As amostras de BaBi(1-x)CoxO3 (x = 0, 1, 2, 4 e 8 mol%) sintetizadas pelo método sol-gel foram inicialmente caracterizadas por difração de raios X (DRX). Os difratogramas indicaram elevada cristalinidade para todas as composições, com picos intensos e estreitos característicos da estrutura monoclínica do BaBiO3. Não foram observadas fases secundárias, mesmo para a amostra contendo 8 mol% de cobalto, evidenciando que a dopagem ocorreu de forma eficaz na estrutura cristalina do material. Com o aumento da concentração de Co foi observado deslocamento dos picos para ângulos maiores, indicando redução do espaçamento interplanar e contração da célula cristalina. O refinamento de Rietveld confirmou a boa incorporação do cobalto na rede do BaBiO3, uma vez que as quantidades experimentais dos dopantes apresentaram boa concordância com os valores teóricos utilizados na síntese. Além disso, foi observada diminuição do volume da célula unitária e redução do tamanho médio dos cristalitos à medida que aumentava a concentração de cobalto. Esse comportamento foi atribuído à substituição preferencial de íons Bi3+ por íons Co2+/Co3+, cujos raios iônicos são menores, favorecendo a contração da rede cristalina e a geração de defeitos estruturais. A espectroscopia Raman revelou bandas de espalhamento típicas dos modos

vibracionais dos octaedros BiO6 presentes na estrutura do BaBiO3. As amostras apresentaram perfis espectrais semelhantes, porém com pequenas alterações nas posições e intensidades das bandas em função da dopagem, indicando que a introdução de cobalto promove modificações locais na estrutura cristalina sem alterar significativamente a fase principal do material. As análises por espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS) permitiram investigar os estados de oxidação dos elementos presentes nas amostras. Os espectros confirmaram a coexistência dos estados Bi3+ e Bi5+, característica típica do BaBiO3. A introdução de cobalto aumentou a razão Bi5+/Bi3+, sugerindo que o Co substitui preferencialmente o Bi3+ e promove compensação de carga por meio da oxidação parcial do bismuto. Também foram observadas alterações nos picos do oxigênio, indicando aumento de defeitos relacionados à rede cristalina e à formação de vacâncias de oxigênio, fatores que favorecem o transporte de cargas durante o processo fotocatalítico. A morfologia das partículas foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (FESEM). As amostras apresentaram partículas irregulares, de aspecto grosseiro, com evidências de coalescência entre partículas vizinhas e presença de nanopartículas aderidas à superfície. Com o aumento da concentração de cobalto foi observada redução no tamanho aparente das partículas e formação de estruturas mais interligadas, indicando que a dopagem influencia o crescimento e a organização das partículas durante a calcinação. A análise química por EDX confirmou a presença de Ba, Bi, O e Co nas amostras dopadas, corroborando a incorporação do dopante observada nas análises estruturais. As propriedades ópticas foram investigadas por espectroscopia UV-Vis de refletância difusa. Todas as amostras apresentaram absorção ao longo da região visível do espectro, característica importante para aplicações fotocatalíticas sob luz solar. A estimativa da energia de band gap mostrou redução progressiva com o aumento da concentração de cobalto, passando de aproximadamente 2,18 para 2,11 eV para transição direta e de 2,04 para 2,00 eV para transição indireta. Essa diminuição foi atribuída aos defeitos eletrônicos introduzidos pela dopagem, que criam níveis intermediários de energia e facilitam a absorção de luz visível. As análises eletroquímicas por Mott-Schottky indicaram que tanto o BaBiO3 puro quanto a amostra BBO8C apresentam comportamento de semicondutor tipo n. A dopagem deslocou significativamente o potencial da banda de condução para valores mais negativos, favorecendo a redução de espécies oxidantes e aumentando a capacidade do material de participar de reações fotocatalíticas. Os resultados de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) mostraram menor resistência à transferência de carga para a amostra BBO8C, evidenciando maior eficiência na separação e mobilidade dos pares elétron-lacuna. A atividade fotocatalítica foi avaliada utilizando o corante azul de metileno (MB) sob irradiação de luz visível proveniente de uma lâmpada halógena. Antes da exposição à luz, as amostras permaneceram em contato com o corante por 30 minutos no escuro para estabilização dos processos de adsorção. Todas as amostras apresentaram baixa capacidade adsorptiva, com valores próximos de 13% para as composições mais dopadas. Após o início da irradiação, observou-se degradação progressiva do corante, sendo a eficiência diretamente influenciada pela concentração de cobalto. A amostra BBO8C apresentou o melhor desempenho fotocatalítico, alcançando aproximadamente 80% de degradação do azul de metileno após 120 minutos de irradiação. Em contraste, o BaBiO3 puro degradou apenas cerca de 20% do corante no mesmo intervalo de tempo. Esse aumento expressivo da atividade fotocatalítica foi atribuído à combinação de redução do band gap, maior geração de defeitos estruturais, aumento da mobilidade dos portadores de carga e melhor separação dos pares elétron-lacuna promovida pela dopagem com cobalto. As constantes cinéticas obtidas para a

degradação do azul de metileno indicaram que o modelo de pseudo-primeira ordem descreve adequadamente o comportamento fotocatalítico das amostras. Observou-se aumento contínuo da constante cinética com o incremento da concentração de cobalto, confirmando quantitativamente a melhoria do desempenho fotocatalítico das amostras dopadas. Também foi investigada a influência do pH da solução na atividade fotocatalítica. Para o BaBiO3 puro, o meio ácido proporcionou aumento da eficiência de degradação em relação ao meio neutro. Já para a amostra BBO8C, o melhor desempenho foi obtido em pH neutro, apresentando eficiência aproximadamente 22% superior à observada em meio ácido. As análises de ponto de carga zero (PZC) indicaram valores próximos de 4,9 para BBO e 5,2 para BBO8C. Os resultados sugerem que a adsorção do azul de metileno não é controlada exclusivamente por interações eletrostáticas, mas também por mecanismos como forças de van der Waals e complexação superficial. Os mecanismos de degradação fotocatalítica foram estudados por meio da adição de sequestradores de elétrons, lacunas e radicais hidroxila. A presença de ácido cítrico, sequestrador de lacunas, provocou redução significativa da eficiência fotocatalítica, especialmente para a amostra BBO8C, enquanto o nitrato de prata e o ácido tereftálico apresentaram efeitos menos pronunciados. Esses resultados indicam que as lacunas fotogeradas desempenham papel predominante no processo de degradação do azul de metileno, sendo a oxidação direta do corante na superfície do semicondutor o mecanismo mais importante durante a fotocatálise. A estabilidade do material foi avaliada por testes de reutilização da amostra BBO8C ao longo de quatro ciclos consecutivos. Após cada ciclo, o fotocatalisador foi recuperado, seco e reutilizado nas mesmas condições experimentais. A eficiência fotocatalítica permaneceu praticamente constante, com valor médio de aproximadamente 79,5%, demonstrando elevada estabilidade química e estrutural. O difratograma obtido após o quarto ciclo confirmou a preservação da fase cristalina do BaBiO3, evidenciando que a dopagem com cobalto não compromete a durabilidade do material durante sucessivos processos fotocatalíticos. De modo geral, os resultados demonstram que a dopagem do BaBiO3 com cobalto promove modificações estruturais, eletrônicas e ópticas que aumentam significativamente a eficiência fotocatalítica do material. A amostra contendo 8 mol% de Co apresentou o melhor desempenho, combinando elevada atividade fotocatalítica, boa separação de cargas, redução do band gap e excelente estabilidade durante reutilizações consecutivas. Esses resultados indicam que o BaBiO3 dopado com cobalto é um material promissor para aplicações em fotocatálise heterogênea e no tratamento sustentável de poluentes orgânicos presentes em águas residuais.

Conclusão

A rota sol-gel mostrou-se um método simples, confiável e eficaz para a síntese de BaBiO3 dopado com cobalto, sem formação de fases secundárias. As análises estruturais, ópticas e eletroquímicas indicaram que a dopagem com Co promove alterações significativas na rede cristalina do material, favorecendo a separação e o transporte de cargas e aumentando consideravelmente sua atividade fotocatalítica. A amostra com 8 mol% de cobalto (BBO8C) apresentou o melhor desempenho, alcançando aproximadamente 80% de degradação do azul de metileno em 120 minutos sob luz visível, desempenho cerca de quatro vezes superior ao observado para o BaBiO3 puro. Os resultados também indicaram que as lacunas fotogeradas desempenham papel predominante no mecanismo de degradação do corante. Além da elevada eficiência fotocatalítica, a amostra BBO8C demonstrou boa estabilidade estrutural e química,

preservando seu desempenho após quatro ciclos consecutivos de reutilização. Dessa forma, os resultados obtidos evidenciam que o BaBiO3 dopado com cobalto é um material promissor para aplicações em fotocatálise heterogênea e no tratamento sustentável de poluentes em ambientes aquosos.

Referências

ZHU, Y. et al. Accelerating stability of ABX3 perovskites analysis with machine learning. Ceramics International, v. 50, p. 6250–6258, 2024. BOUWMEESTER, R. L.; BRINKMAN, A. BaBiO3—from single crystals towards oxide topological insulators. Reviews in Physics, v. 6, p. 100056, 2021. SHTAREV, D. S. et al. Revisiting the BaBiO3 semiconductor photocatalyst: synthesis, characterization, electronic structure, and photocatalytic activity. Photochemical & Photobiological Sciences, v. 20, p. 1147–1160, 2021. TAYARI, F. et al. Sol–Gel Synthesis and Comprehensive Study of Structural, Electrical, and Magnetic Properties of BiBaO3 Perovskite. Gels, v. 11, p. 450, 2025. WANG, H. et al. A review on heterogeneous photocatalysis for environmental remediation: from semiconductors to modification strategies. Chinese Journal of Catalysis, v. 43, p. 178–214, 2022. MORSHEDY, A. S. et al. A review on heterogeneous photocatalytic materials: mechanism, perspectives, and environmental and energy sustainability applications. Inorganic Chemistry Communications, v. 163, p. 112307, 2024. PORTUGAL, G. R. et al. Composition-dependent photocatalytic activity and high-mobility carrier gas in NaTaO3/BaBiO3 heterojunctions. Surface and Interfaces, v. 36, p. 102486, 2023. MUÑOZ-BATISTA, M. J.; LUQUE, R. Heterogeneous photocatalysis. MDPI, v. 5, p. 26, 2021. TANG, L. et al. Effects of Co doping on the growth and photocatalytic properties of ZnO particles. Molecules, v. 27, p. 833, 2022. WOOD, D. L.; TAUC, J. Weak absorption tails in amorphous semiconductors. Physical Review B, v. 5, p. 3144–3151, 1972. PATTERSON, A. L. The Scherrer formula for X-ray particle size determination. Physical Review, v. 56, p. 978–982, 1939. GE, J. et al. Solution-processed Nb-substituted BaBiO3 double perovskite thin films for photoelectrochemical water reduction. Chemistry of Materials, v. 30, p. 1017–1031, 2018. CHOUHAN, A. S. et al. BaBiO3: a potential absorber for all-oxide photovoltaics. Materials Letters, v. 210, p. 218–222, 2018.

CÓDIGO: ET0067

AUTOR: LUANA GABRIELE FREIRE DO NASCIMENTO

ORIENTADOR: BISMARCK LUIZ SILVA

TÍTULO: Simulação, Solidificação e Dureza da liga Zn-8%Al-2%Ag

Resumo

Este trabalho teve como objetivo investigar os efeitos da adição de prata (2%Ag em massa) no processo de solidificação e nas características microestruturais e térmicas da liga Zn-8%Al solidificada direcionalmente fora de equilíbrio termodinâmico. Cálculos termodinâmicos foram realizados utilizando o software Thermo-Calc, pelo método CALPHAD, para determinar o caminho de solidificação, as fases formadas e suas proporções. As amostras foram caracterizadas por Microscopia Óptica (MO), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX). A macroestrutura apresentou crescimento equiaxial ao longo de todo o lingote, diferentemente da macroestrutura colunar observada para a liga binária Zn-8%Al. Os resultados indicaram a formação das fases Zn, AgZn, AlAg, AlZn e $AlAg_3$, em concordância com os cálculos termodinâmicos. A composição química manteve-se próxima ao teor nominal de 2%Ag, apresentando leve redução nas últimas posições do lingote, caracterizando macrossegregação inversa. A adição de Ag promoveu redução da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus (VL) e da taxa de resfriamento ($\dot{T}L$) quando comparada à liga binária. As análises por MEV evidenciaram morfologia dendrítica para a fase rica em Al e morfologias monotética e eutética para as demais fases, indicando que a adição de prata alterou significativamente a evolução microestrutural durante a solidificação.

Palavras-chave: Ligas de Zn-8%Al; Solidificação; Macroestrutura; Microestrutura.

TITLE: Simulation, Solidification, and Hardness of the Zn-8 wt.% Al-2 wt.% Ag Alloy

Abstract

This study aimed to investigate the effects of silver addition (2 wt.% Ag) on the solidification process and on the microstructural and thermal characteristics of the Zn-8 wt.% Al alloy directionally solidified under non-equilibrium thermodynamic conditions. Thermodynamic calculations were performed using Thermo-Calc software based on the CALPHAD method to determine the solidification path, phases formed, and their proportions. The samples were characterized by Optical Microscopy (OM), Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD), and X-ray Fluorescence (XRF).

The macrostructure exhibited equiaxed growth throughout the entire ingot, unlike the columnar macrostructure observed for the binary Zn-8 wt.% Al alloy. The results indicated the formation of Zn, AgZn, AlAg, AlZn, and $AlAg_3$ phases, in agreement with the thermodynamic calculations. The chemical composition remained close to the nominal Ag content of 2 wt.%, with a slight decrease at the final positions of the ingot, indicating inverse macrosegregation. The addition of Ag reduced the liquidus isotherm displacement velocity (V_L) and cooling rate (Ṫ_L) compared with the binary alloy. SEM analyses revealed a dendritic morphology for the Al-rich phase and monotectic and eutectic morphologies for the other phases, indicating that the addition of silver significantly altered the microstructural evolution during solidification.

Keywords: Zn-8 wt.% Al alloys; Solidification; Macrostructure; Microstructure.

Introdução

As ligas do sistema Zn-Al têm sido extensivamente estudadas por constituírem a base das ligas comerciais denominadas ZA (Zinco-Alumínio), que podem conter pequenas adições de cobre (0,8 a 3,0%) e magnésio (0,015 a 0,04%) em peso [1-4]. O zinco apresenta boa fluidez, resistência à corrosão e baixo ponto de fusão, características que, associadas às propriedades das ligas Zn-Al, favorecem sua aplicação em fundição sob pressão, revestimentos metálicos, mancais e componentes sujeitos a desgaste [1,2,4]. A resistência ao desgaste dessas ligas está relacionada, entre outros fatores, à formação de óxidos de alumínio e zinco na superfície, nos quais o Al_2O_3 atua no suporte das cargas e os óxidos de Zn apresentam efeito lubrificante limitado [4]. Além disso, o controle de impurezas é fundamental, uma vez que teores elevados podem comprometer as propriedades mecânicas, de desgaste e de corrosão [1]. Dentre as características metalúrgicas dessas ligas, destaca-se o comportamento durante a solidificação, que influencia a morfologia e a distribuição das fases no material. No sistema Zn-Al, a reação eutética ocorre a 381 °C para uma composição de 5,1% em massa de Al, sendo o alumínio responsável por contribuir para o refino dos grãos, aumento da fluidez e melhoria da resistência mecânica [5]. Ligas Zn-Al hipoeutéticas apresentam dendritas ricas em Zn (fase η), enquanto as hipereutéticas apresentam dendritas ricas em Al (fase α) e matriz de Zn, com morfologias dendríticas e eutéticas. A evolução microestrutural está diretamente relacionada às condições de solidificação e à composição química [6]. Variáveis como taxa de resfriamento (Ṫ), velocidade de solidificação (V), gradiente térmico (G), super-resfriamento constitucional (SRC), coeficiente de transferência de calor metal/molde (hi) e composição inicial (C_0) exercem papel fundamental na definição da microestrutura e das propriedades finais da liga [6,7]. Nesse contexto, a solidificação direcional é amplamente empregada no estudo de macroestrutura, microestrutura, segregação de solutos, propriedades mecânicas e eficiência da transferência de calor entre molde e metal [8-10]. Esses estudos podem ser realizados em condições estacionárias ou transitórias de fluxo de calor. No regime estacionário, G e V são controlados independentemente, como nos experimentos Bridgman/Stockbarger [11-13], enquanto no regime transitório essas variáveis variam com o tempo e a posição no metal fundido [6,14]. Apesar das vantagens das ligas à base de Zn, algumas limitações podem ocorrer durante seu processamento, como baixa resistência mecânica em temperaturas elevadas, segregação de elementos durante a solidificação e formação de macroestruturas colunares, que podem comprometer a uniformidade das

propriedades [2]. A adição de elementos de liga constitui uma estratégia para contornar essas limitações. O Mg pode melhorar a fluidez e reduzir defeitos de fundição, o Cu pode aumentar a resistência mecânica e a dureza, enquanto o Bi pode modificar a microestrutura e as características de usinabilidade [15]. Diante desses desafios, este trabalho tem como hipótese que a adição de 2% de prata (Ag) à liga Zn-8%Al pode modificar seu comportamento térmico e caminho de solidificação, além de promover alterações microestruturais e nas propriedades mecânicas, contribuindo para o desenvolvimento de ligas com potencial aplicação em revestimentos e processos de fabricação que exijam estabilidade térmica, resistência à corrosão e desempenho estrutural. Observação importante: mantive todas as referências [1-15], inclusive as [11-13], que aparecem apenas no trecho sobre Bridgman/Stockbarger. Também retirei algumas informações básicas sobre número atômico, massa atômica e minerais do Zn porque elas ocupavam bastante espaço e não são essenciais para sustentar o objetivo do seu trabalho.

Metodologia

A liga Zn-8%Al-2%Ag foi obtida a partir de um dispositivo de solidificação unidirecional vertical (DSDV) ascendente, amplamente utilizado e reportado na literatura especializada [16-18]. A liga Zn-8%Al-2%Ag foi fundida em um cadinho de carbeto de Si, inserido num forno de indução de características definidas (marca Yuelon modelo MF-35), com temperatura de trabalho de até 1200 ºC. Após a fusão, a liga foi vertida dentro da lingoteira, acoplada ao DSDV através de uma chapa-molde de aço AISI 1020, com posterior solidificação natural. Em seguida, o sistema de aquecimento do forno de solidificação direcional foi acionado e a liga foi refundida dentro do dispositivo. Quando a temperatura atingiu um superaquecimento de 10 a 15% (470°C) acima da temperatura liquidus-TL da liga, a solidificação direcional foi iniciada através do acionamento de um jato de água na parte inferior da chapa-molde. Desse modo, a solidificação se desenvolveu de forma vertical, de baixo para cima. Uma série de termopares (marca ECIL modelo tipo J) acoplada em diferentes posições ao longo da lingoteira foi utilizada para análise da evolução térmica durante o processo. Os dados que foram coletados pelos termopares foram armazenados em um computador para posterior utilização no levantamento das variáveis térmicas de solidificação, como a velocidade de avanço da isoterma liquidus (VL) e a taxa de resfriamento (ṪL). Uma vez concluído o processo, extraiu-se o lingote da lingoteira para caracterização macroestrutural e microestrutural subsequentes. A Figura 1 exemplifica a metodologia de extração de amostras conforme definida. Para a técnica de caracterização macroestrutural, foi feito um corte na direção longitudinal do tarugo obtido (como visto na Figura 1, etapa 1), visando a obtenção de uma superfície regular para a etapa de lixamento. Sendo assim, o lingote foi seccionado através de uma serra fita (modelo FM-500). Em seguida, a parte do lingote que foi escolhida para revelação da macroestrutura foi lixada com lixas de granulometria 80, 120, 180, 240, 320, 400 e 600 mesh. Logo após, a superfície lixada foi atacada quimicamente utilizando-se uma solução aquosa do reagente nital (solução de ácido nítrico e álcool), com concentração de ácido nítrico de 5% [24]. O ataque foi realizado na superfície da amostra por repetidas vezes com algodão embebido neste reagente químico até a obtenção de uma macroestrutura de qualidade. Por fim, a macroestrutura foi lavada em água corrente e secada utilizando um secador e o resultado da revelação foi registrado através de uma câmera fotográfica. As amostras para caracterização das microestruturas transversais foram identificadas

através da medição realizada com auxílio de um paquímetro analógico, com resolução de 0,02 mm, tendo como referência e ponto zero a base do lingote, isto é, a posição foi medida em relação à interface metal/molde. Uma vez feita a marcação, amostras relativas às posições 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm,70 mm, 80 mm e 90 mm a partir da interface metal/molde foram extraídas da parte do tarugo anteriormente utilizada para caracterização microestrutural. Em seguida, as amostras foram lixadas sequencialmente por lixas de granulometria 150, 240, 320, 400, 600, 1200, 1500, 2000 e 2500 mesh de maneira manual e refrigeradas com água. As amostras depois de lixadas e limpas, foram polidas manualmente com auxílio de uma politriz lixadeira metalográfica dupla (modelo PLF D da FORTEL, São Paulo, SP, Brasil), utilizando uma suspensão metalográfica de alumina (granulometria 1 μm, da marca Arotec) e água. A revelação das microestruturas da liga produzida, por sua vez, foi feita mediante imersão das amostras extraídas das posições anteriormente definidas em uma solução química de nital 2% por um tempo de aproximadamente 5 segundos. O registro das imagens das microestruturas foi realizado através de um microscópio óptico (marca Nikon modelo Eclipse MA2000) disponível no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica (LIME-DEMat-UFRN). As análises de Difração de Raios-X (DRX) foram realizadas nas amostras 5 mm, 30 mm, 50 mm e 90 mm, amostras retiradas de posições específicas ao longo do lingote Zn-8%Al-2%Ag solidificado direcionalmente, a fim de identificar as fases presentes em cada posição. O equipamento utilizado é da marca Shimadzu, equipado com tubo de radiação de cobre (Cu), cuja radiação característica Kα possui comprimento de onda de 0,154 nm (1,54 Å). Para determinar a variação do teor Ag na liga Zn-8%Al-2%Ag, análises de Fluorescência de Raios-X (FRX) foram realizadas nas posições transversais (5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm e 90 mm a partir da interface metal/molde) no equipamento da marca Shimadzu modelo EX-720, disponibilizado no LIME/UFRN. As simulações termodinâmicas foram realizadas pelo método CALPHAD através do software Thermo-calc com o intuito de extrair informações como diagramas de fases, de modo que é possível observar a predominância de cada fase formada durante o processo de solidificação em equilíbrio, considerando as composições químicas selecionadas. Para isso, contou-se com o apoio do Grupo de Pesquisa “Microestruturas e Propriedades em Processos de Solidificação” (M2PS), do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar, coordenado pelo prof. Dr. José Eduardo Spinelli.

Resultados e Discussões

A Figura 2 mostra um corte isoplético para a liga Zn-8%Al-2%Ag obtido pelo software Thermo-Calc para condições de equilíbrio termodinâmico. A linha preta tracejada no diagrama indica o teor de Ag (2% em massa de Ag) relativo à composição da liga em estudo. Observa-se pelo diagrama que a temperatura limite da fase liquidus para a composição com 2%Ag é de 415 °C. Logo abaixo da temperatura liquidus, a fase Al’ pró-eutética começa a se formar, com surgimento e crescimento dos núcleos de Al’ de acordo com o resfriamento da liga. Com a continuidade da solidificação, ao chegar na temperatura de 384 °C inicia-se a formação da fase rica em Zn e na temperatura abaixo de 275 °C começa o enriquecimento do teor de Ag, formando a fase AgZn. Estudos anteriores, como os de Septimio et al. [20] e Medeiros et al. [4], avaliaram a influência de um terceiro elemento de liga, como bismuto (Bi) e cobre (Cu), sobre a liga base Zn-8%Al. De forma semelhante ao observado com Bi e Cu, a adição de prata promoveu um

pequeno aumento da temperatura líquidus de aproximadamente 409 °C para 415 °C. As demais temperaturas de transformação, por outro lado, como a temperatura de transformação eutetóide (275 °C) e de precipitação da fase rica em Zn (384 ºC), mantiveram-se praticamente inalteradas comparadas àquelas obtidas para o sistema Zn-8%Al. Esse comportamento evidencia que pequenas adições de Ag, como a adição de 2%Ag, não alteram significativamente a temperaturas líquidus da liga hipereutética Zn-8%Al, mas podem contribuir para a formação de novas fases, como no caso da fase AgZn. A Tabela 1 exibe um resumo das reações e temperaturas de transformação que podem ser visualizadas na Figura 2. A Figura 3 exibe a variação da temperatura (°C) em função do tempo (s) para cada termopar acoplado na lingoteira, correspondente à liga Zn–8%Al–2%Ag. Observa-se que as maiores variações de temperatura no tempo ocorrem para as posições mais próximas da interface metal/molde. Este comportamento decorre da proximidade com a chapa-molde, que atua como principal fonte de extração de calor durante o processo de solidificação direcional. A diferença nas taxas de resfriamento ao longo das posições promove variações microestruturais caracterizadas pelo refinamento da fase primária nas regiões submetidas a maiores taxas de resfriamento, e influenciam a formação e distribuição das fases metálicas, como Al', Zn e AgZn, durante o processo de solidificação. A Figura 4 exibe a relação entre os tempos locais de passagem da isoterma liquidus (tL) em cada posição (P) ao longo do lingote Zn-8%Al-2%Ag. Os tempos locais exibidos são dados importantes para mapear o comportamento dessa relação correspondente entre a posição de fixação dos termopares com os relativos tempos de passagem, de acordo com a liga Zn-8%Al-2%Ag analisada. É possível observar-se na Figura 4 que menores tempos locais são obtidos para a liga com 2%Ag, o que parece indicar uma constância na velocidade de avanço da isoterma. Esses menores tempos locais também podem aferir em algum nível de refinamento microestrutural da liga Zn-8%Al-2%Ag. Tal fenômeno de constância tende a fazer com que a curva da liga Zn-8%Al-2%Ag possua um raio de inclinação menor quando comparado com a curva da liga Zn-8%Al. A Figura 5 apresenta uma relação entre a variação da velocidade da isoterma liquidus (VL) com a posição (P). Verifica-se que VL diminui à medida que se afasta da interface metal/molde, o que está associado com o aumento da dificuldade de movimentação da frente de solidificação durante a solidificação direcional. O intervalo de VL nas posições analisadas do lingote variou de 0,75 mm/s (P = 05 mm) para 0,4 mm/s (P = 90 mm) a partir da interface metal/molde. A Figura 5 apresenta também a relação da variável citada anteriormente para a liga hipereutética Zn-8%Al obtida por Septimio et al. [20]. Observa-se um comportamento comum e habitual para as ligas até a posição de aproximadamente 20 mm a partir da interface metal-molde, onde menores valores de VL para a liga ternária podem ser visualizados. Uma mudança de caráter pode ser discutida com a inversão de posição das curvas a partir da posição 20 mm. O motivo da mudança pode estar associado ao intervalo de solidificação mais amplo apresentado através do corte isoplético da liga Zn-8%Al-2%Ag, que exibe uma formação de fases mais extensas e, portanto, com estrutura mais complexa. Os valores das variáveis térmicas do sistema Zn-8%Al relativamente à VL foram investigados anteriormente por Septimio et al. [20] e Medeiros et al. [4]. A tendência de redução da velocidade é consistente com o comportamento esperado em solidificação unidirecional, onde há perda gradual de calor ao longo do comprimento do lingote. Comparando com os resultados da literatura, Septimio et al. [20] observaram, para a liga Zn–8%Al, uma variação de VL entre 2,3 mm/s (início do lingote) e aproximadamente 0,2 mm/s (final), enquanto Medeiros et al. [4] relataram uma redução da VL com o aumento do teor de Cu, apresentando valores de até 1,99 mm/s (0,3%Cu) e 1,76 mm/s (1,3%Cu). Esses dados mostram que a adição de elementos de liga, como

Ag (neste estudo) ou Cu (nos estudos feitos por Medeiros et al. [4]), tende a diminuir a velocidade da isoterma liquidus, o que pode estar relacionado à alteração das propriedades térmicas da liga e à maior resistência à movimentação da frente de solidificação ao longo do lingote. A Figura 6 exibe a variação das taxas de resfriamento (ṪL) em função da posição (P) ao longo do lingote Zn-8%Al-2%Ag. Nota-se que maiores valores de taxas de resfriamento são observados para as posições próximas à interface metal/molde, com uma redução gradual para as últimas posições. Essa diferença está no fato de que nas posições próximas da interface metal/molde, tem-se uma maior extração de calor através do acionamento do sistema de refrigeração à água na chapa-molde. A taxa de resfriamento para a liga Zn-8%Al-2%Ag variou de 7,4 °C/s a 1 °C/s, respectivamente, para as posições 05 mm e 90 mm a partir da interface metal/molde. Septimio et al. [20] obtiveram valores de ṪL que variaram de 30 ºC/s (05 mm) até 0,015 ºC/s (90 mm). Medeiros et al. [4], por sua vez, observaram valores de ṪL que aumentaram de acordo com a elevação do teor de Cu, partindo de aproximadamente 27 ºC/s (05 mm, 0,3%Cu) para 37,5 ºC/s (05 mm, 1,3%Cu). Os autores observaram que não há variações significativas para as posições finais do lingote nos valores de ṪL, a exemplo do que também ocorreu na presente investigação. A Figura 7 mostra a macroestrutura do lingote Zn-8%Al-2%Ag. Observa-se um crescimento equiaxial desde a base do lingote até o topo. Estudos anteriores indicam que o aumento do teor de prata (Ag) em ligas à base de zinco promove o refinamento de grãos e atua contra o crescimento de grãos colunares. Em particular, López-Parra et al. [21] evidenciaram que a adição de Ag favorece a formação da fase intermetálica AgZn3, que serve como centro de nucleação e suprime explicitamente a estrutura colunar em ligas Zn–Al–Ag. A Figura 8 apresenta o teor de Ag ao longo do lingote da liga estudada. Os resultados de composição química indicam baixa macrossegregação, observando-se apenas uma discreta tendência de macrossegregação normal, caracterizada pelo leve empobrecimento de Ag nas posições mais distantes da interface metal/molde. Observa-se teor próximo de 2% Ag até a posição de 50 mm, seguido de uma redução não uniforme nas posições posteriores. A presença de Ag é particularmente importante, pois sua adição está relacionada a modificações na microestrutura da liga, como o refinamento de grãos e a formação de fases intermetálicas, que podem influenciar diretamente nas propriedades mecânicas e térmicas do material [10]. Estudos prévios com ligas contendo prata mostram comportamentos distintos quanto à macrossegregação desse elemento. Em ligas do sistema Zn-Ag, Dias Filho [22] observou variações na concentração de Ag ao longo do lingote para composições hipoperitéticas e hiperperitéticas, indicando a ocorrência de macrossegregação em diferentes regiões do material solidificado de cada liga. De modo semelhante, Duarte [23], ao estudar ligas Al-Ag, identificou que o teor de Ag variou ao longo do comprimento dos lingotes, mesmo sob condições controladas de solidificação unidirecional, o que também caracteriza macrossegregação. Esses resultados reforçam a importância de se avaliar a distribuição do soluto, uma vez que perfis não homogêneos podem comprometer o desempenho mecânico e térmico dos materiais. A presença da macrossegregação na liga Zn-8%Al-2%Ag analisada, representa um comportamento microestrutural indesejável, pois evidencia uma distribuição não uniforme do soluto ao longo do lingote. Essa heterogeneidade composicional pode promover variações na fração e na distribuição das fases formadas durante a solidificação, resultando em diferenças locais nas propriedades mecânicas, na resistência à corrosão e no comportamento do material durante o processamento e a aplicação. Dessa forma, observa-se uma distribuição heterogênea do soluto quando comparada a outras ligas do sistema Zn-Al. A Figura 9 apresenta os difratogramas de raios X da liga Zn–8%Al–

2%Ag obtidos em diferentes posições ao longo do lingote, variando de 5 mm a 90 mm a partir da interface metal/molde. É possível identificar picos característicos das fases presentes na liga, sendo elas as fases contendo Zn, AlAg, AlZn, AlAg3 e AgZn, fases dos sistemas binários Al–Zn, Ag–Zn e Al–Ag descritos por Massalski (1990) [25] e Okamoto [26].Observa-se que as fases identificadas estão presentes em todas as amostras analisadas e os picos mais intensos correspondem à matriz de Zn. A fase AgZn (◊), por sua vez, aparece em menor quantidade (dois picos) e com menor intensidade, mesmo com 2% de Ag, porém é detectável em todas as posições, evidenciando que a prata se combinou preferencialmente com o alumínio formando as fases AlAg e AlAg3 e com o zinco durante a solidificação, formando um composto intermetálico. Os picos associados à fase de Zn são os mais intensos, o que comprova que a maior quantidade do elemento metálico presente é zinco na composição da liga. A adição de 2%Ag na liga de Zn-8Al, mesmo em pequena quantidade comparada aos demais, sugere que essa adição de prata promove a formação de fases secundárias específicas, como as fases de AlAg, AgZn e AlAg3. A variação na intensidade e na nitidez desses picos ao longo das diferentes posições analisadas também está associada às mudanças na taxa de resfriamento, influenciando diretamente o tamanho de grão, a segregação de elementos e a predominância de determinadas fases cristalinas [20]. A Figura 10 mostra as microestruturas obtidas por microscópio óptico (MO) para as posições 05 mm, 30 mm, 70 mm e 90 mm na seção transversal a partir da interface metal/molde. Observa-se um arranjo dendrítico da fase Al (regiões escuras), Zn (região clara), com as dendritas de Al cercadas de uma mistura de fases resultante da transformação eutetóide de matriz de Zn, com disposição das fases Zn, AgZn, AlAg, AlZn e $AlAg_3$, conforme identificado por DRX. As fases intermetálicas encontram-se distribuídas predominantemente nas regiões interdendríticas, envolvendo os braços dendríticos da fase Al e formando um arranjo microestrutural heterogêneo. Nas posições mais próximas à interface metal/molde, onde as taxas de resfriamento são mais elevadas, observa-se um maior refinamento das dendritas, enquanto nas posições mais afastadas ocorre um crescimento mais pronunciado dessas estruturas, em função da redução da taxa de resfriamento. Estudos como os de Septimio et al. [20] e Medeiros et al. [4] demonstram que a presença de um terceiro elemento na liga Zn–Al, especialmente em ligas hipereutéticas, influencia significativamente a morfologia e a distribuição das fases. A adição de elementos como Ag, Cu ou Mg tende a promover refinamento microestrutural ou modificações no tipo de crescimento dendrítico, afetando o tamanho dos grãos, a segregação das fases secundárias e a resposta mecânica do material. Em comparação às ligas Zn-Al-Bi, nas quais o Bi tende a se concentrar nas regiões interdendríticas sem promover alterações significativas na morfologia dendrítica, e às ligas Zn-Al-Cu e Zn-Al-Mg, que apresentam formação de intermetálicos ricos em Cu e Mg e maior refinamento microestrutural, respectivamente, a adição de Ag resulta na formação de fases intermetálicas ricas em prata distribuídas entre os braços dendríticos, conferindo um arranjo microestrutural mais complexo, sem alterar o crescimento equiaxial observado na macroestrutura [27-29]. No quesito da liga Zn-Al-Ag, as mudanças são atribuídas à alteração na nucleação e na cinética de crescimento das fases durante a solidificação [20]. A Figura 11 exibe microestruturas obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para as posições 05 mm, 50 mm e 90 mm a partir da interface metal/molde. Nas microestruturas da posição 50 mm (Figura 11 d) estão indicadas as fases de Zn (regiões mais claras), as dendritas ricas em Al (regiões escuras), e as regiões eutéticas que apresentam fases Zn + Al + AgZn nas fronteiras dendríticas. É possível observar uma evolução microestrutural significativa ao longo do lingote. Nas imagens correspondentes à posição de 05 mm, próximas à interface, nota-se uma microestrutura

com dendritas finas, resultantes de uma taxa de resfriamento mais elevada, onde a solidificação ocorre rapidamente, o que limita o crescimento das fases. À medida que se avança para a posição de 50 mm, a microestrutura é compreendida de mais fases, com crescimento mais desenvolvido das fases primárias, incluindo dendritas de alumínio mais longas e maior evidência da presença das fases Zn e AgZn. Por fim, nas imagens obtidas a 90 mm, observa-se um crescimento ainda mais acentuado das dendritas de alumínio, com separação clara entre as regiões ricas em Zn, Al e AgZn. A presença dessas fases é devido a solidificação mais lenta nas regiões superiores do lingote. Observa-se dendritas bem definidas e regiões interdendríticas ocupadas por uma mistura de fases. As dendritas de Al apresentam um crescimento orientado, enquanto as regiões claras indicam a presença predominante de Zn. A formação das fases intermetálicas ocorre preferencialmente entre as dendritas, sugerindo segregação durante a solidificação e uma notável influência da adição de prata na morfologia dessas fases, principalmente quando se compara com as morfologias observadas pelos estudos de Septmio et al. [20]. A Figura 12 apresenta a variação da microdureza Vickers da liga Zn-8%Al-2%Ag em função da posição ao longo do lingote, a partir da interface metal/molde. Observa-se que os valores médios não apresentaram variação significativa ao longo de toda a extensão analisada, variando entre aproximadamente 67,6 HV e 69,9 HV. As regiões próximas da interface metal/molde por serem submetidas a maiores taxas de resfriamento, promovendo refinamento microestrutural. Esse comportamento pode ser atribuído à baixa macrossegregação de Ag observada por FRX, bem como à distribuição relativamente homogênea das fases identificadas por DRX e pelas análises microestruturais realizadas por microscopia óptica e eletrônica de varredura. Dessa forma, os resultados indicam que a adição de 2% de Ag contribuiu para manter propriedades mecânicas relativamente uniformes ao longo do lingote solidificado direcionalmente. Ao comparar os resultados obtidos neste trabalho com o trabalho de Septimio [3] é possível observar que a adição de 2% de prata à liga Zn-8%Al promoveu mudanças significativas na morfologia macroestrutural e microestrutural da liga. O trabalho de Septimio [3] avaliou a liga Zn-8%Al sob solidificação unidirecional e identificou a formação de uma macroestrutura predominantemente colunar dendrítica ao longo do comprimento do lingote. Tal morfologia foi associada às condições térmicas impostas durante o processo de solidificação, especialmente ao alto gradiente térmico próximo à interface metal/molde, que favorece a extração unidirecional de calor promovendo o crescimento direcional das dendritas [3]. No presente estudo, entretanto, a adição de 2% de prata (Ag) à liga Zn-8%Al promoveu a formação de uma macroestrutura equiaxial dendrítica em todo o lingote, sugerindo uma alteração significativa no mecanismo de nucleação e crescimento. Essa mudança morfológica pode ser atribuída à presença da prata no caminho de solidificação e à formação das fases intermetálicas Zn, AgZn, AlAg, AlZn e AlAg3, que, conforme identificado por difração de raios X (DRX), modificaram a evolução da solidificação ao promover alterações na nucleação e no crescimento das fases. Além disso, a redução da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus (VL) e da taxa de resfriamento (ṪL), observada em relação à liga binária Zn-8%Al, contribuiu para alterar a dinâmica de crescimento da frente de solidificação. Dessa forma, a adição de Ag não apenas modificou as transformações de fase, mas também influenciou diretamente a cinética de solidificação e a evolução microestrutural da liga.

Conclusão

A partir dos dados experimentais coletados durante a investigação e desenvolvimento deste trabalho, pode-se citar algumas conclusões: ● A adição de 2% de prata à liga Zn-8%Al reduziu a taxa de resfriamento e a velocidade de solidificação em comparação com a liga binária Zn-Al; ● A solidificação da liga ternária Zn-8%Al-2%Ag seguiu a sequência de formação das fases Zn, AlAg, AlZn, AlAg3 e AgZn; ● A macroestrutura apresentou crescimento equiaxial, com efeito determinante da Ag como refinador e repressor do crescimento colunar; ● As microestruturas revelaram dendritas de Al envoltas por matriz rica em Zn, com regiões eutéticas binárias e ternárias; ● O teor de Ag permaneceu em torno de 2% em massa até a posição 50 mm, a partir da 60 mm o teor de prata variou negativamente, indicando uma macrossegregação do tipo inversa. ● O teor de Ag contribuiu para a formação das fases AlAg, AlAg3 e AgZn. ● A microdureza da liga Zn-8%Al-2%Ag apresentou valores praticamente constantes ao longo de todo o lingote, sem efeito da escala microestrutural.

Referências

[1]. BARBOSA, R. J. Metais não ferrosos e suas ligas: Microestrutura, propriedades e aplicações, 1ª edição, editora e-papers, 2014, 532 p. [2]. BARNHURST, R. J. Zinc and Zinc alloys. ASM Properties and Selection: Nonferrous alloys and special-purpose, v. 2, p. 1589-1618, 1990. [3]. SEPTIMIO, R. S. Estudos das ligas dos sistemas Bi-Zn e Zn-Al-Bi para aplicações tecnológicas. 2019. 303 p. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas-SP. [4]. MEDEIROS, M. D. Solidificação direcional e Resistência ao Desgaste de ligas Zn-8%Al-x%Cu. 2020. 101 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Ciência e Engenharia de Materiais, Natal-RN. [5]. PRASAD, B. K. Effect of microstructure on the sliding wear performance of a Zn-Al-Ni alloy. Wear. v. 240, p. 100-112, 2000. [6]. GARCIA, A. Solidificação: Fundamentos e Aplicações. 2ª edição. Campinas: Editora da Unicamp, 2007, 399 p. [7]. FLEMINGS, M. C. Solidification processing. New York: McGraw-Hill, 1974. [8]. BRITO, C.C. Parâmetros térmicos e microestruturais na Solidificação Transitória de ligas Al-Mg e AlMg-Si e Correlação com Resistências Mecânicas e à Corrosão. 2016. 205 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2016. [9]. COSTA, T.A.P.S. Microestruturas de Solidificação e Resistência ao Desgaste de Ligas Monotéticas Al-Bi-Sn. 2016. 175 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2016. [10]. FILHO, J.M.S.D. Solidificação Transitória e Permanente de Ligas Monofásicas e Peritética Sn-Sb e Sn-Sb- (Ag; Cu): Evolução Microestrutural, Molhabilidade e Propriedades Mecânicas. 2016. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2016. [11]. MERTINGER, V. et al. Gravity influenced convection in Al-Ni melt. Materials Science Forum, v. 215-216, p. 331-338, 1996. [12]. JONES, H. Some effects of solidification kinetics on microstructure formation in aluminium base alloys. Materials Science and Engineering A, v. 413-414, p.165-173, 2005. [13]. GRUGEL, R. N. Secondary and tertiary dendrite arm spacing relationships in directionally solidified Al-Si alloys. Journal of Materials Science, v. 28, p. 677-683, 1993. [14]. KURZ, W.; FISHER D.J. Fundamentals of Solidification, 4th edition. Trans Tech Publications Ltd, 1981, 304 p. [15]. CALLISTER, W. D., & Rethwisch, D. G. (2016). Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais (9ª ed.). LTC. p. 375-396.

[16]. SILVA, B. et al. Effects of solidification thermal parameters on microstructure and mechanical properties of Sn-Bi solder alloys. Journal of Electronic Materials, v. 46, p. 1754-1769, 2017. [17]. REYES, R. V. et al. Tensile properties and related microstructural aspects of hypereutectic Al-Si alloys directionally solidified under different melt superheats and transient heat flow conditions. Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, v. 685, p. 235-243, 2017. [18]. DONADONI, B. M. C. et al. Tailoring of microstructures and tensile properties in solidification of Al-11Si(-xCu) brazing alloys. Metals, v. 8, p. 1-23, 2018. [19] SOUSA, Raí Batista de. Microestrutura, Parâmetros Térmicos e Citotoxicidade da Liga Hipoeutética Sn-2,0%Ag Modificada com 0,2%Ni. p. 42, 2022. [20] SEPTIMIO, Rudimylla S. et al. Correlation between unsteady-state solidification thermal parameters and microstructural growth of Zn–8 mass% Al and Zn–8 mass% Al–X Bi tribological alloys. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 139, p. 1741-1761, 2020. [21] BELTRÁN-GONZÁLEZ, J., de la Torre, GC, Ruiz, A. et al. Avaliação Microestrutural de uma Liga Zn-Al-Ag. MRS Avanços 3 , 3621–3627 (2018). https://doi.org/10.1557/adv.2018.662. [22] DIAS FILHO, José Marcelino da Silva. Análises térmica e microestrutural na solidificação de ligas monofásica e peritéticas do sistema Zn-Ag. 2013. Dissertação de Engenharia Mecânica (UEC). [23] DUARTE, Roberto Nunes. Solidificação unidirecional transitória, microestrutura e propriedades termofísicas e mecânicas de ligas Al-Ag-(Cu). 2016. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica (UEC). [24] VANDER VOORT, G. F. Metallography: Principles and Practice. Materials Park: ASM International, 1999. [25] Massalski, T. B. (Ed.). Binary Alloy Phase Diagrams. 2nd ed. ASM International, 1990. [26] Okamoto, H. Al–Ag (Aluminum–Silver). Journal of Phase Equilibria. [27] Prasad, B. K.; Vaidyanathan, S.; Yegneswaran, A. H. Microstructure and abrasive wear response of Zn–Al–Bi bearing alloys. Wear, v. 138, n. 2, p. 271–290, 1990. [28] Moustafa, S. F. Effect of copper addition on the structure and mechanical properties of Zn–Al alloys. Journal of Materials Science, v. 36, p. 3647–3653, 2001. [29] Zhu, Y. M.; Morton, A. J.; Hodgson, P. D. Microstructure evolution and mechanical properties of Zn–Al–Mg alloys. Materials Science and Engineering A.

Anexos



Figura 1: Representação esquemática do processo de retirada de amostras no sentido longitudinal (etapa 1) e transversal e longitudinal (etapa 2) para análise metalográfica (etapa 3) [19]

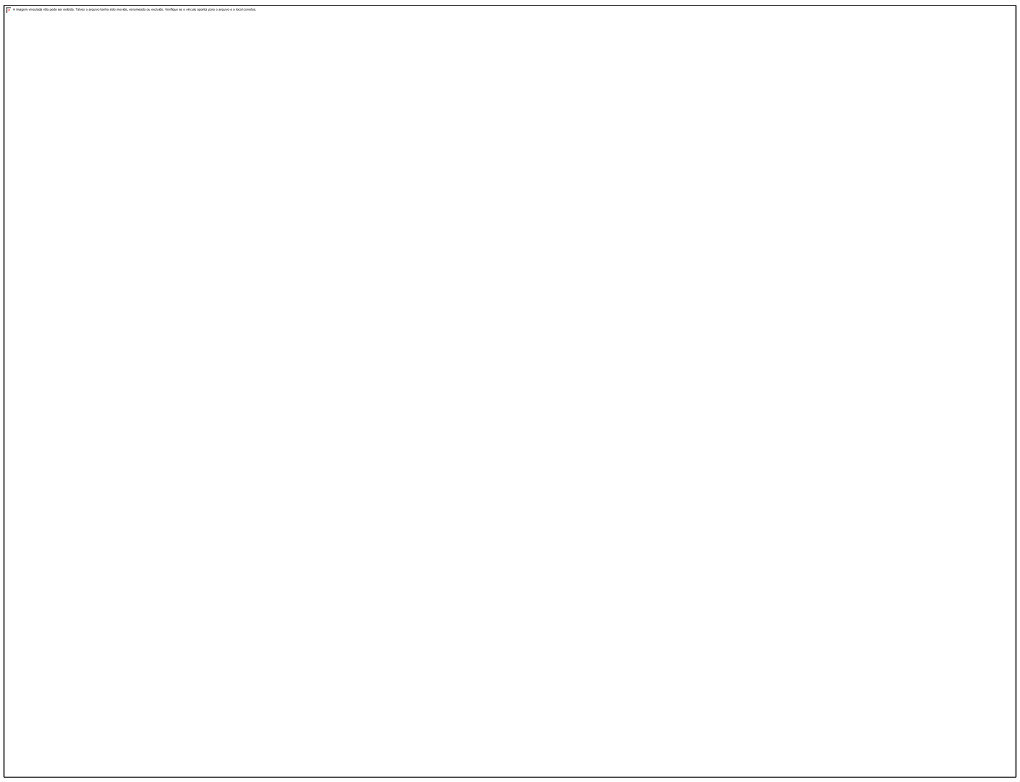


Figura 3: Perfis térmicos dos termopares ao longo do lingote Zn-8%Al-2%Ag.

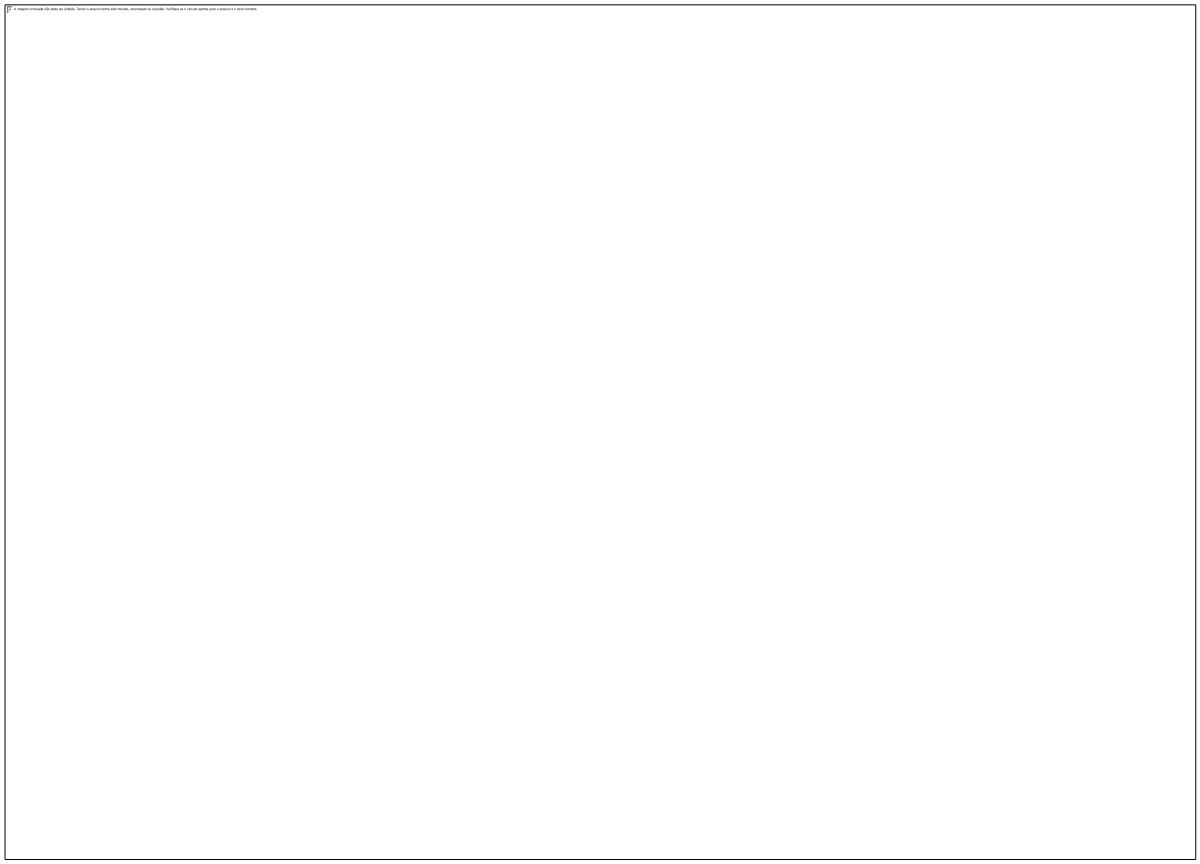


Figura 4: Tempos (tL) locais de passagem da isoterma liquidus para cada posição (P) a partir da interface metal molde para a liga Zn-8%Al-2%Ag.



Figura 5: Evolução da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus (VL) em função da posição (P) a partir da interface metal molde para a liga Zn-8%Al-2%Ag.

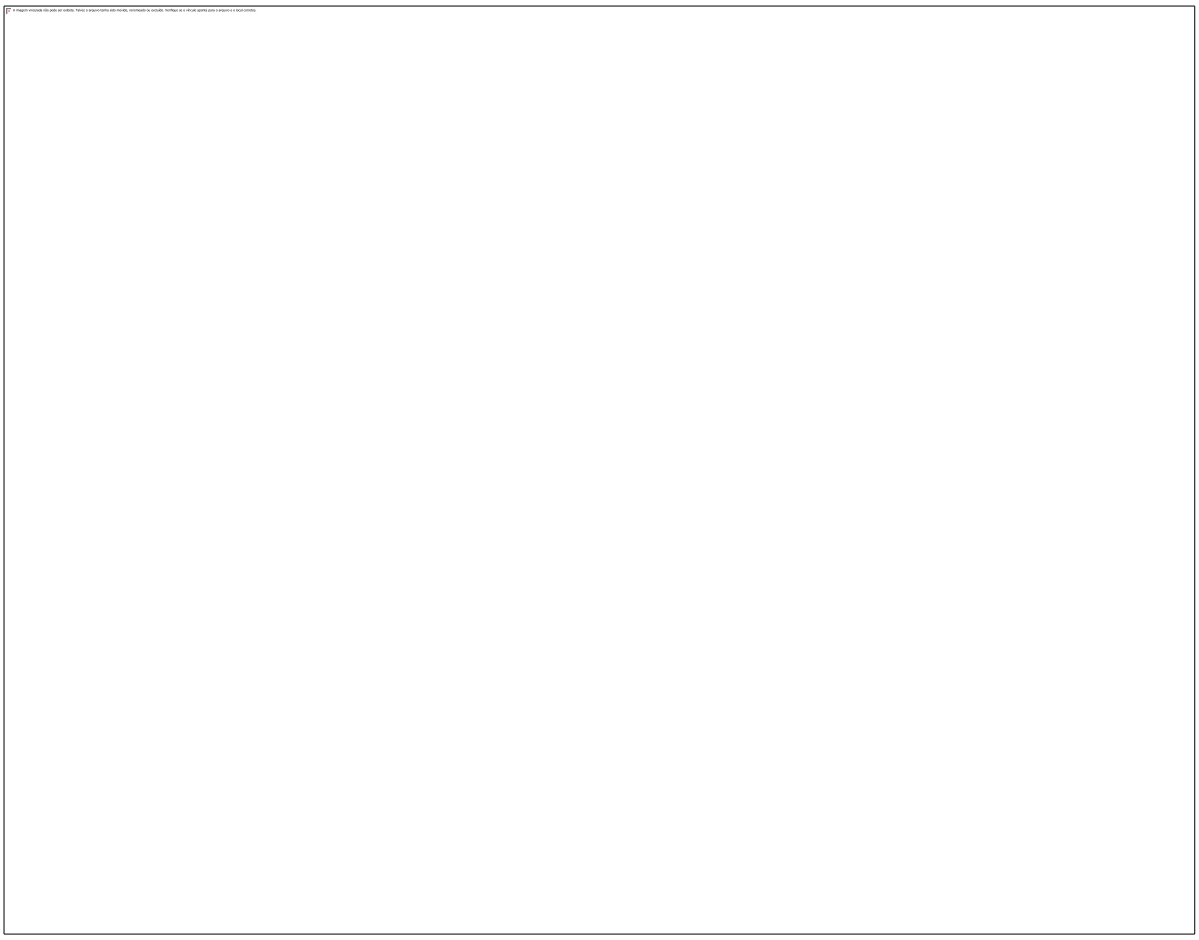


Figura 6: Evolução da taxa de resfriamento (ṪL) em função da posição (P) a partir da interface metalmolde para a liga Zn-8%Al-2%Ag.



Figura 7: Macroestrutura da liga Zn-8%Al-2%Ag.

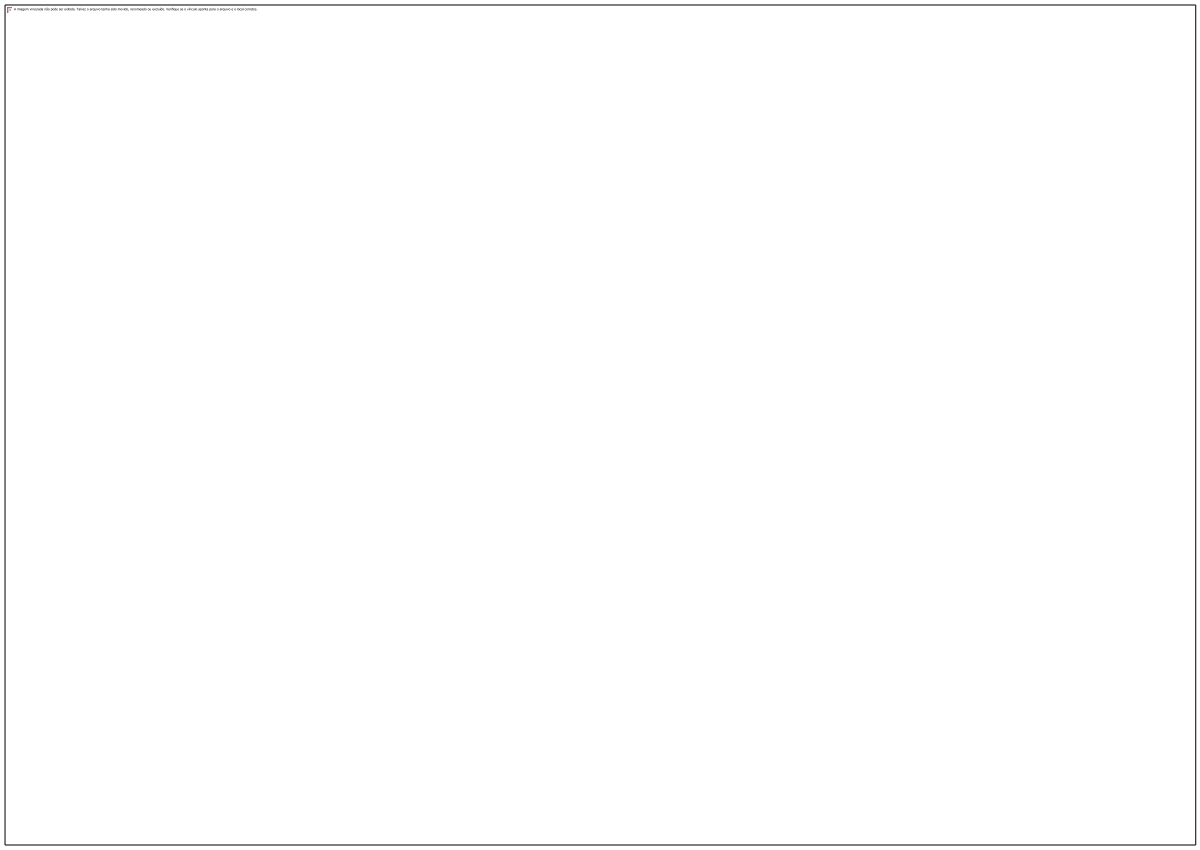


Figura 8: Variação do teor de soluto de Ag na liga Zn-8%Al-2%Ag.

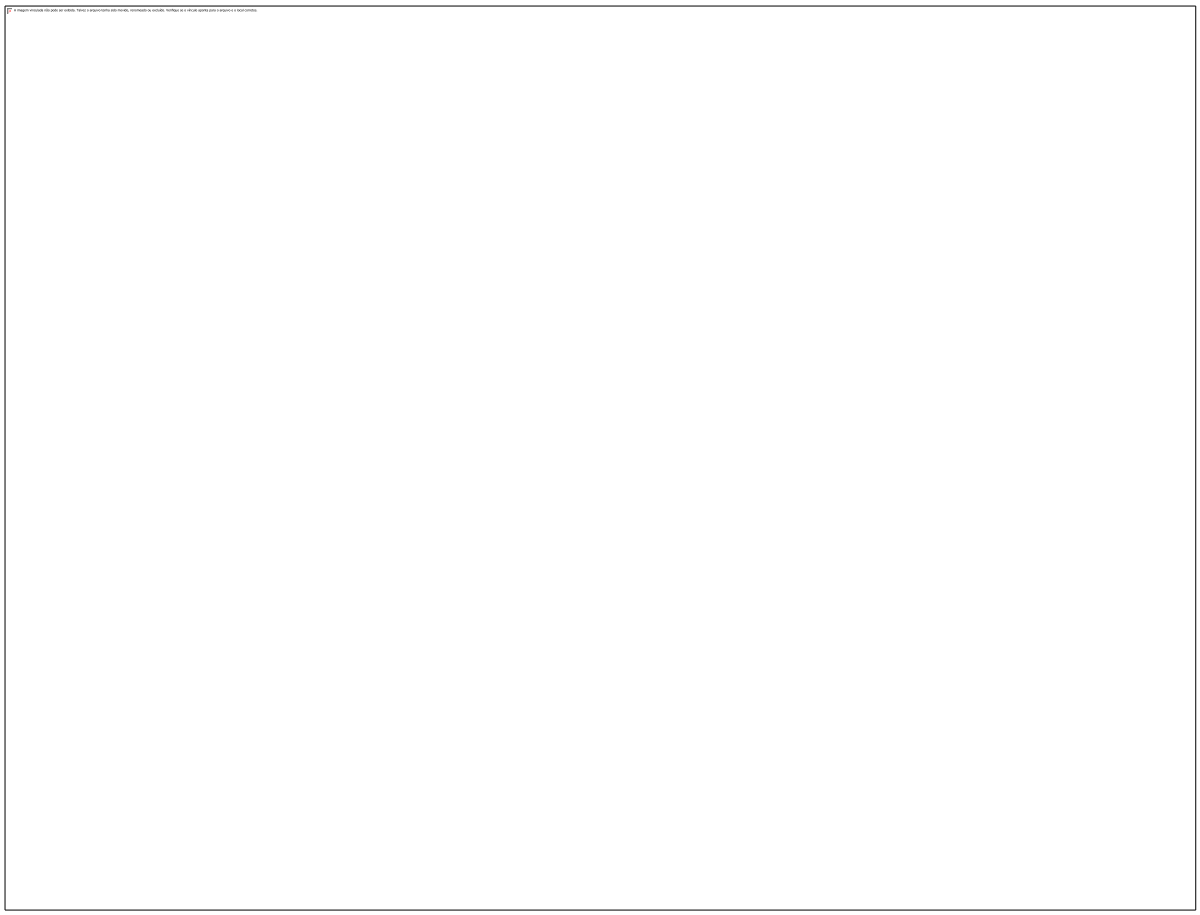


Figura 9: Difratogramas de raios-X da liga Zn-8%Al-2%Ag.

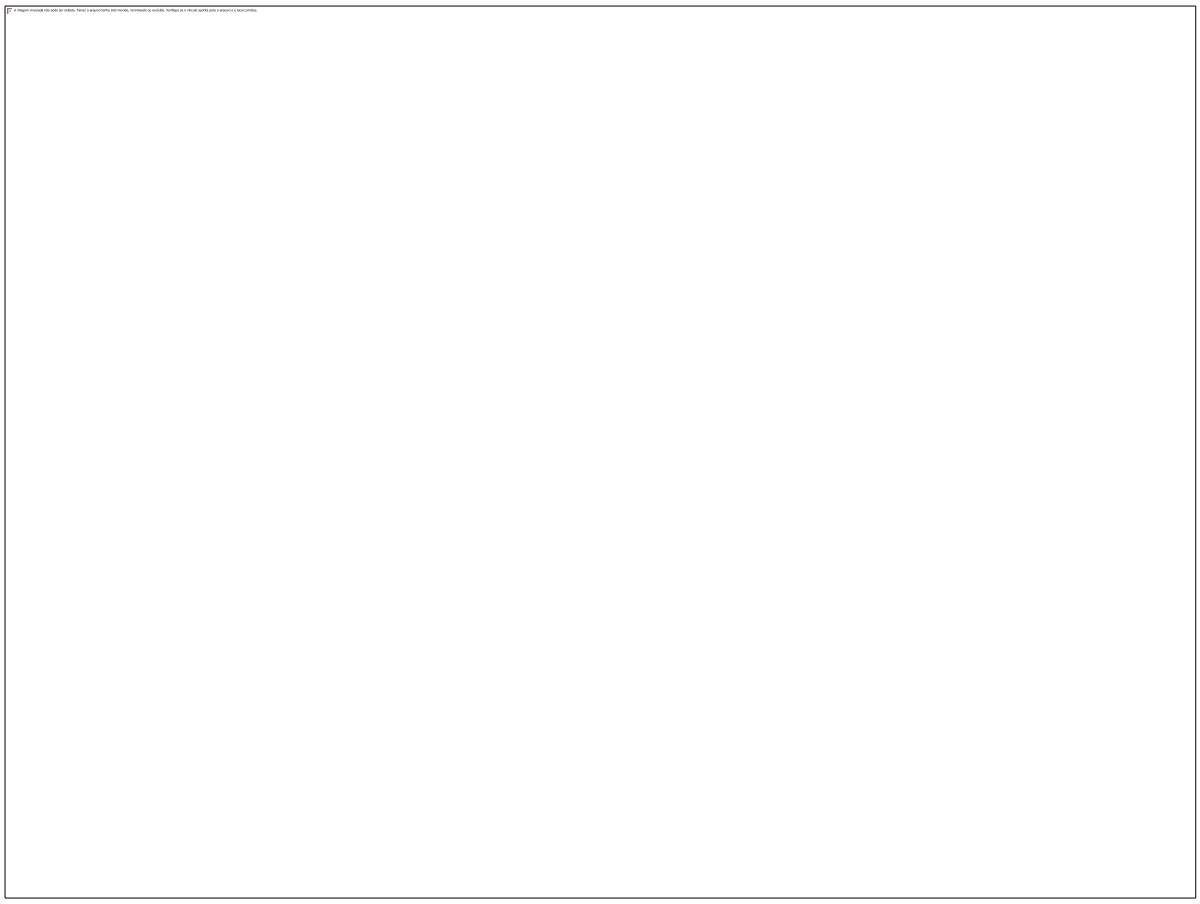


Figura 10: Microestruturas da seção transversal para as posições de 05 mm

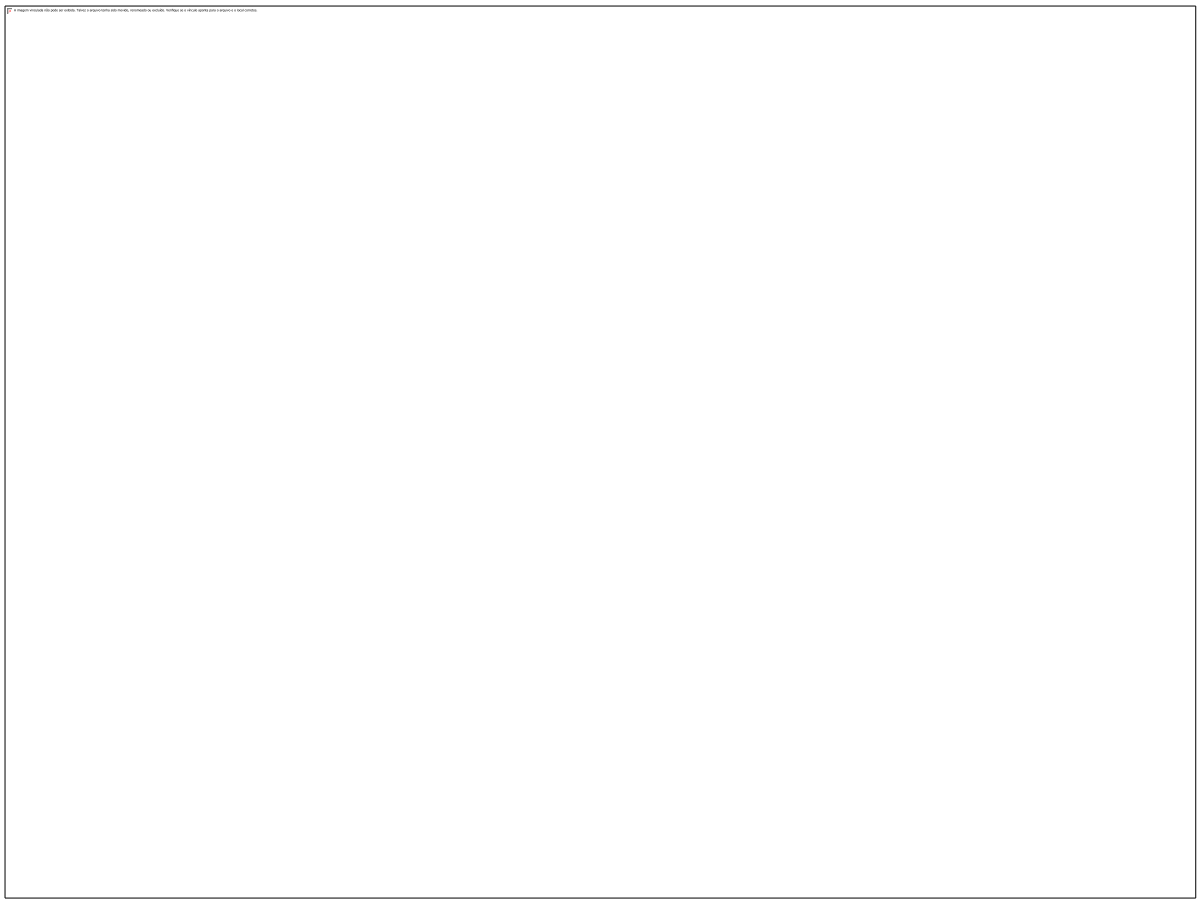


Figura 10: Microestruturas da seção transversal para as posições de 30 mm

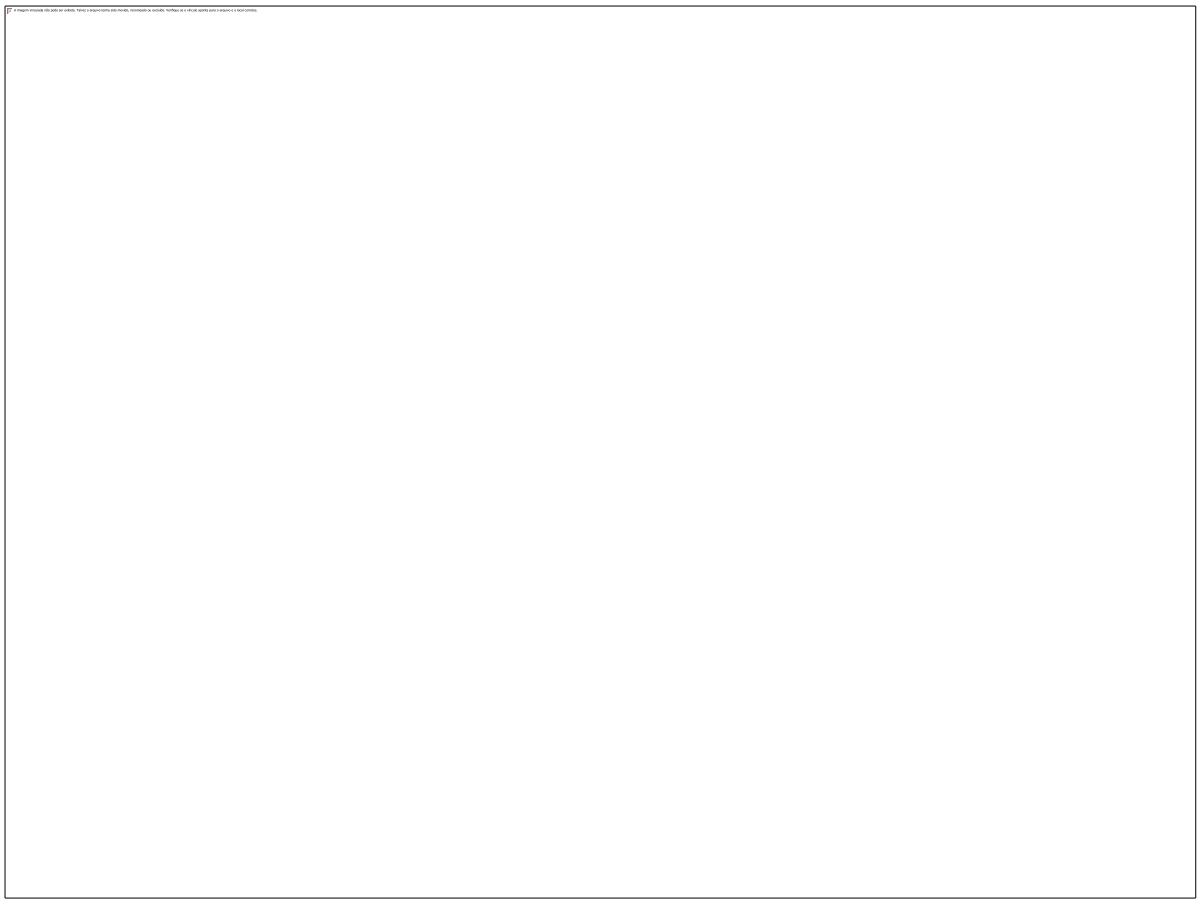


Figura 10: Microestruturas da seção transversal para as posições 70 mm

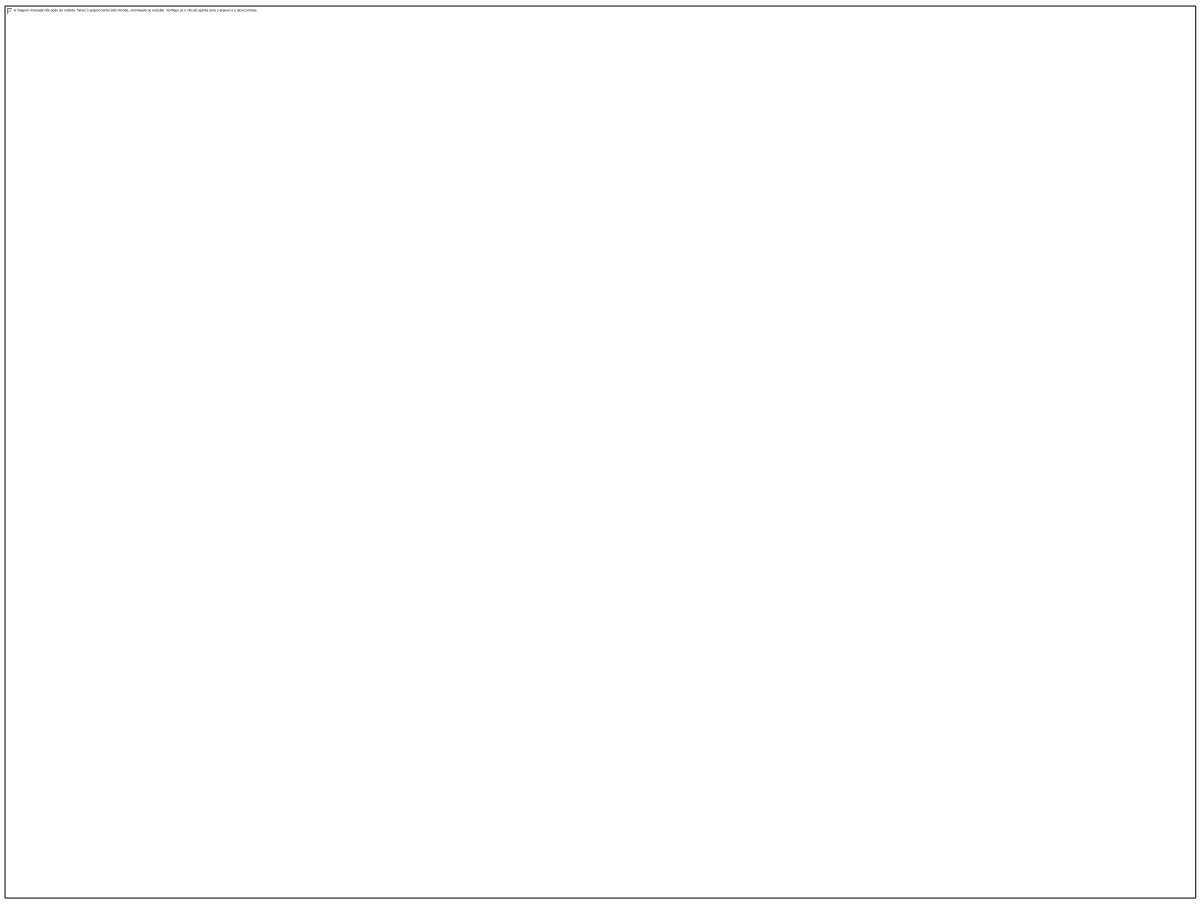


Figura 10: Microestruturas da seção transversal para as posições 90 mm

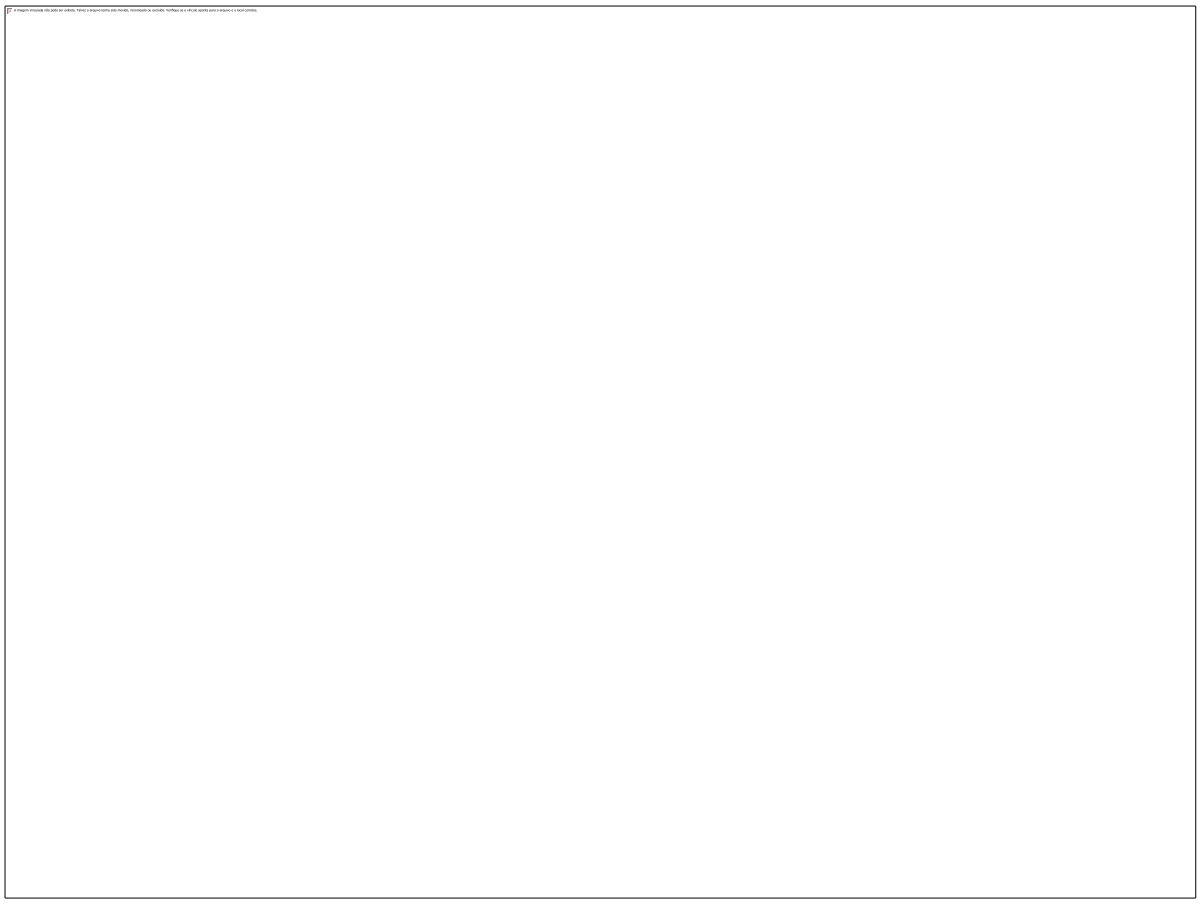


Figura 11: Microestruturas obtidas por MEV para as posições - 05 mm (a)

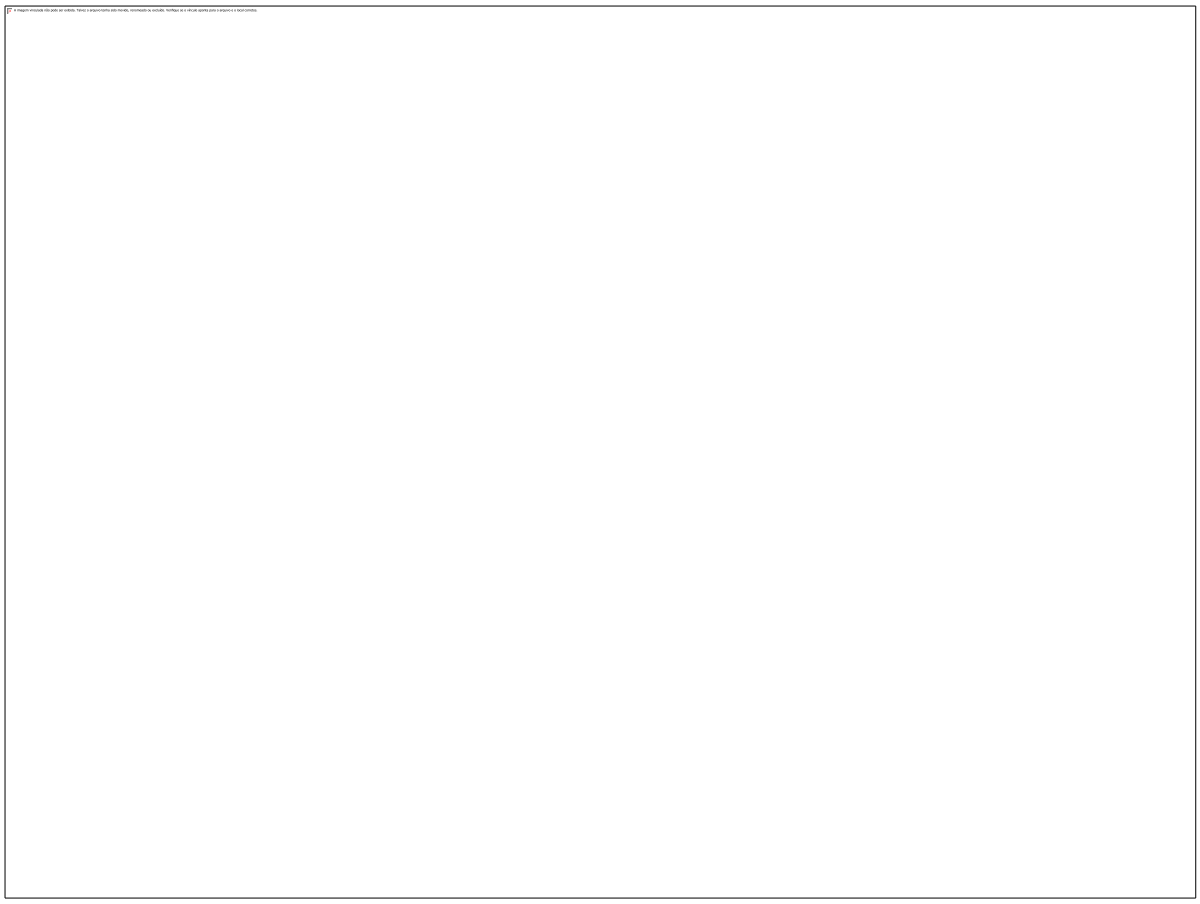


Figura 11: Microestruturas obtidas por MEV para as posições - 05 mm (b)



Figura 11: Microestruturas obtidas por MEV para as posições - 50m (d)



Figura 11: Microestruturas obtidas por MEV para as posições - 90 mm (h)

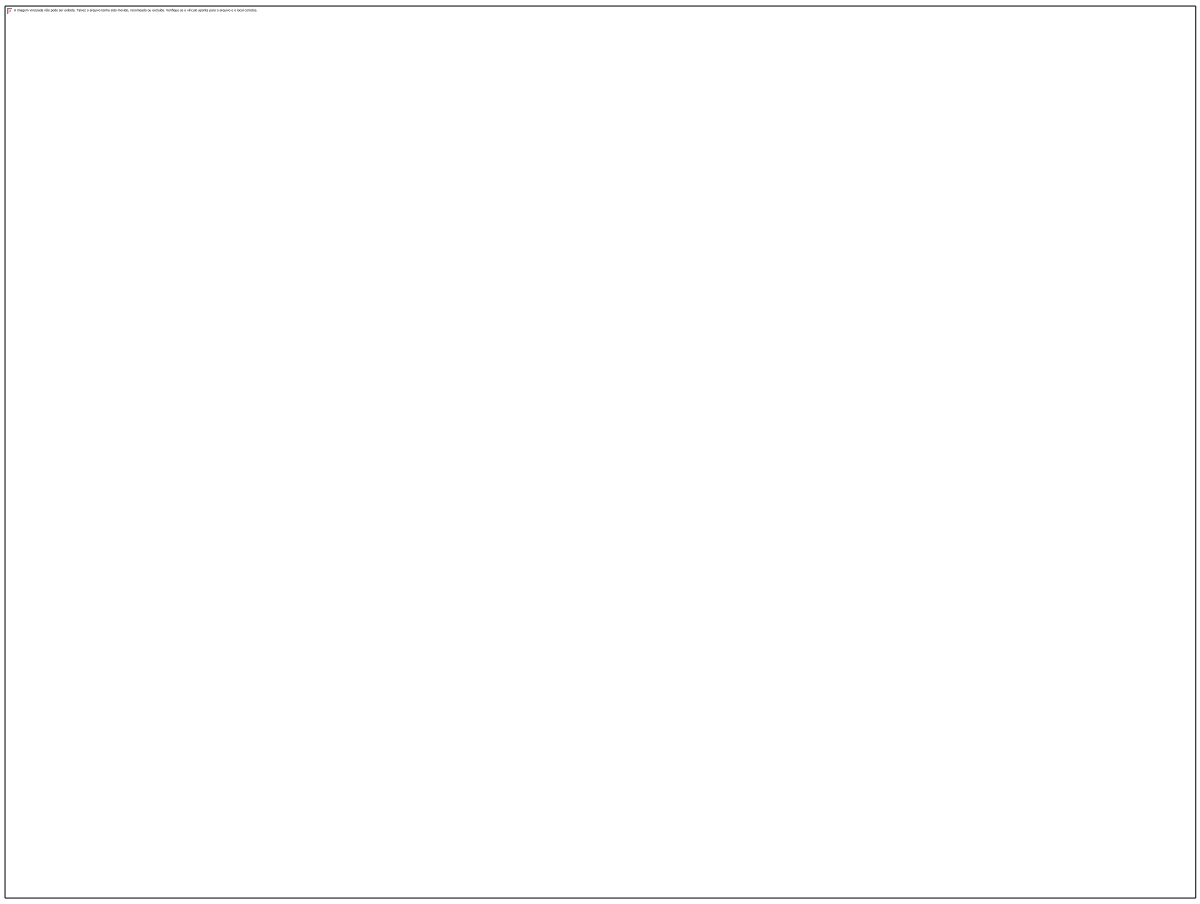


Figura 11: Microestruturas obtidas por MEV para as posições - 90 mm (g)

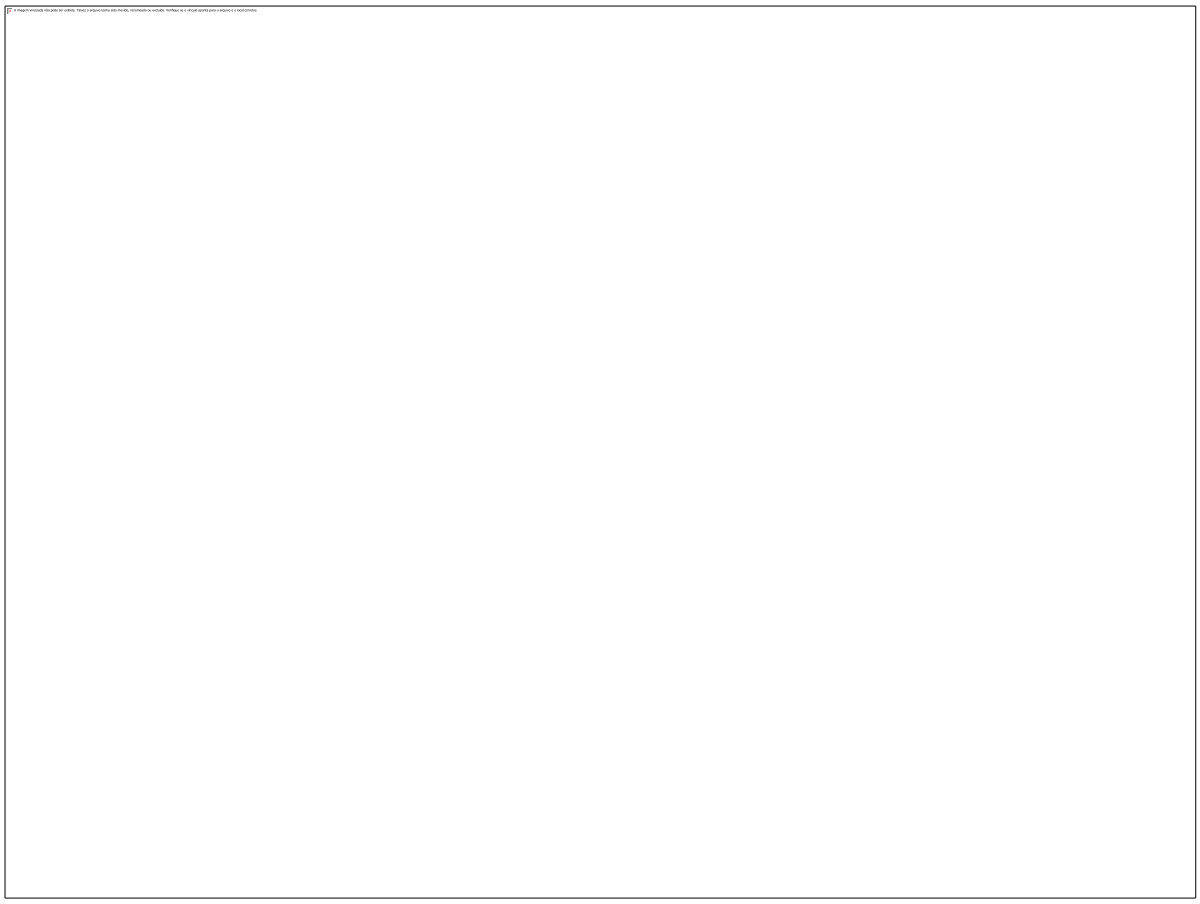


Figura 11: Microestruturas obtidas por MEV para as posições - 50 mm (f)

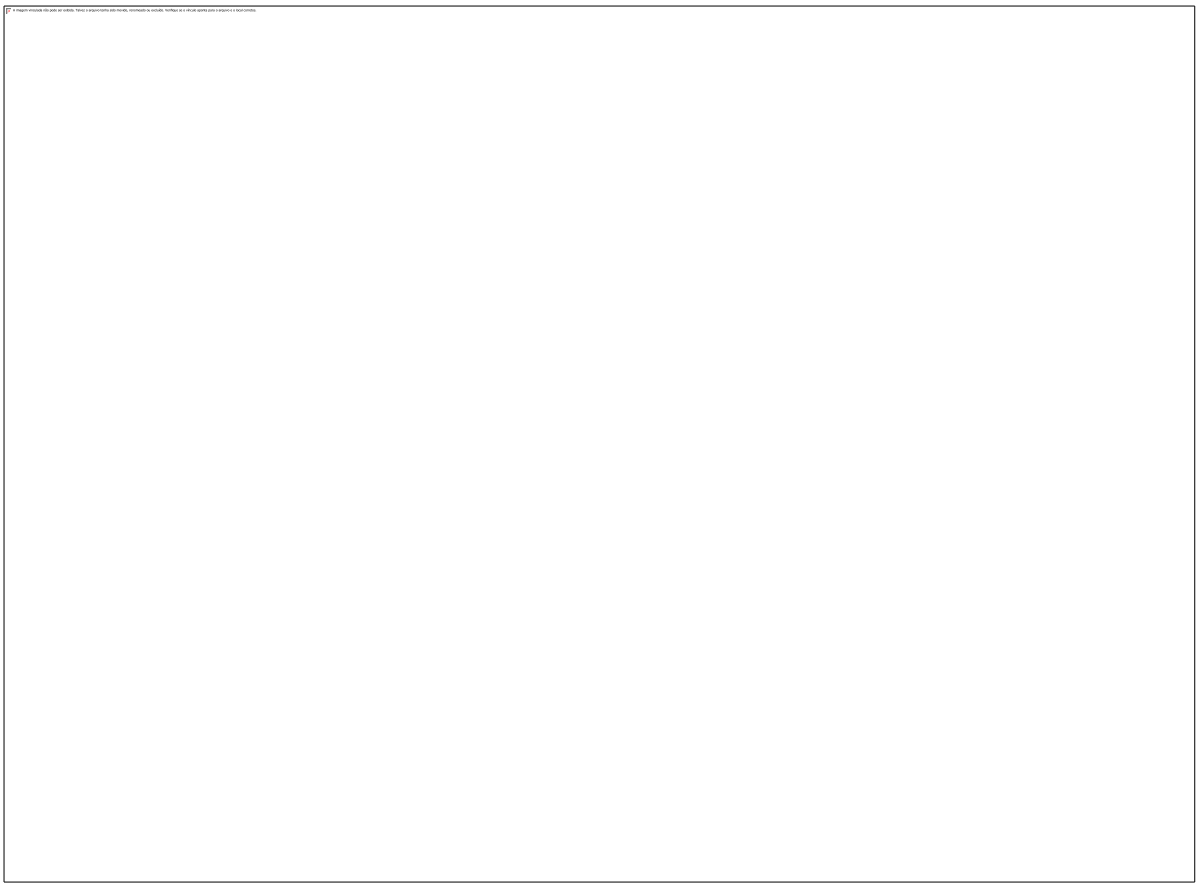


Figura 11: Microestruturas obtidas por MEV para as posições - 50 mm (e)

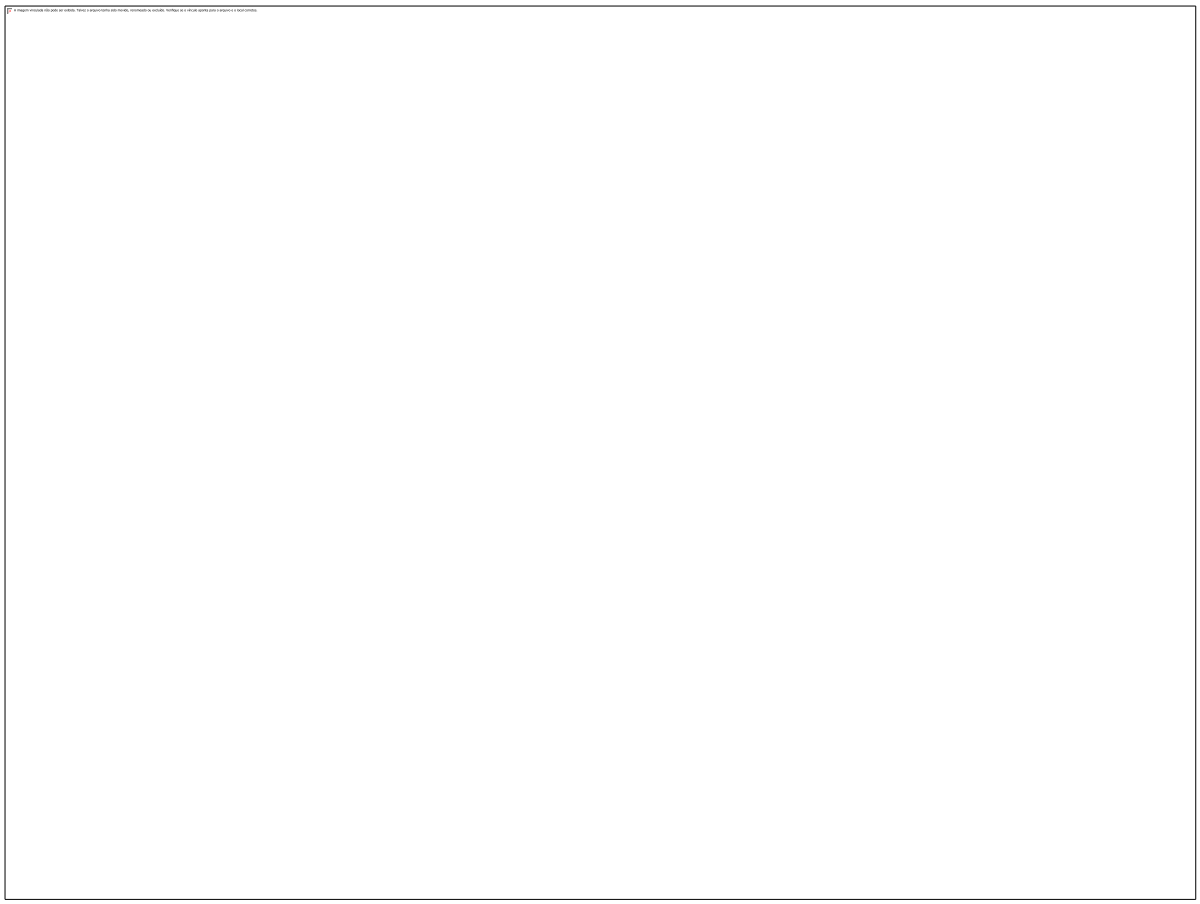


Figura 11: Microestruturas obtidas por MEV para as posições - 05 mm (c)

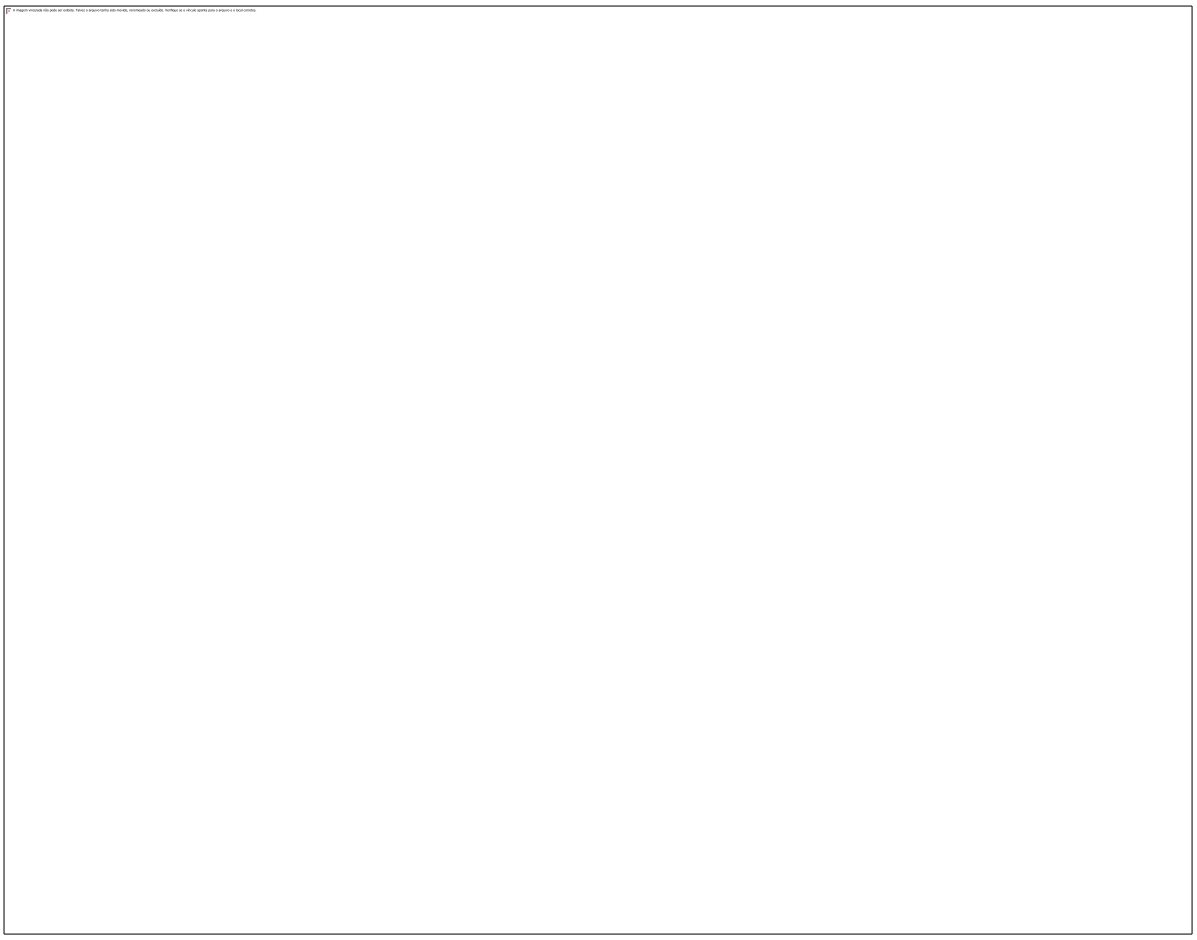


Figura 12: Variação da microdureza Vickers em função da posição ao longo do lingote Zn-8%Al-2%Ag.

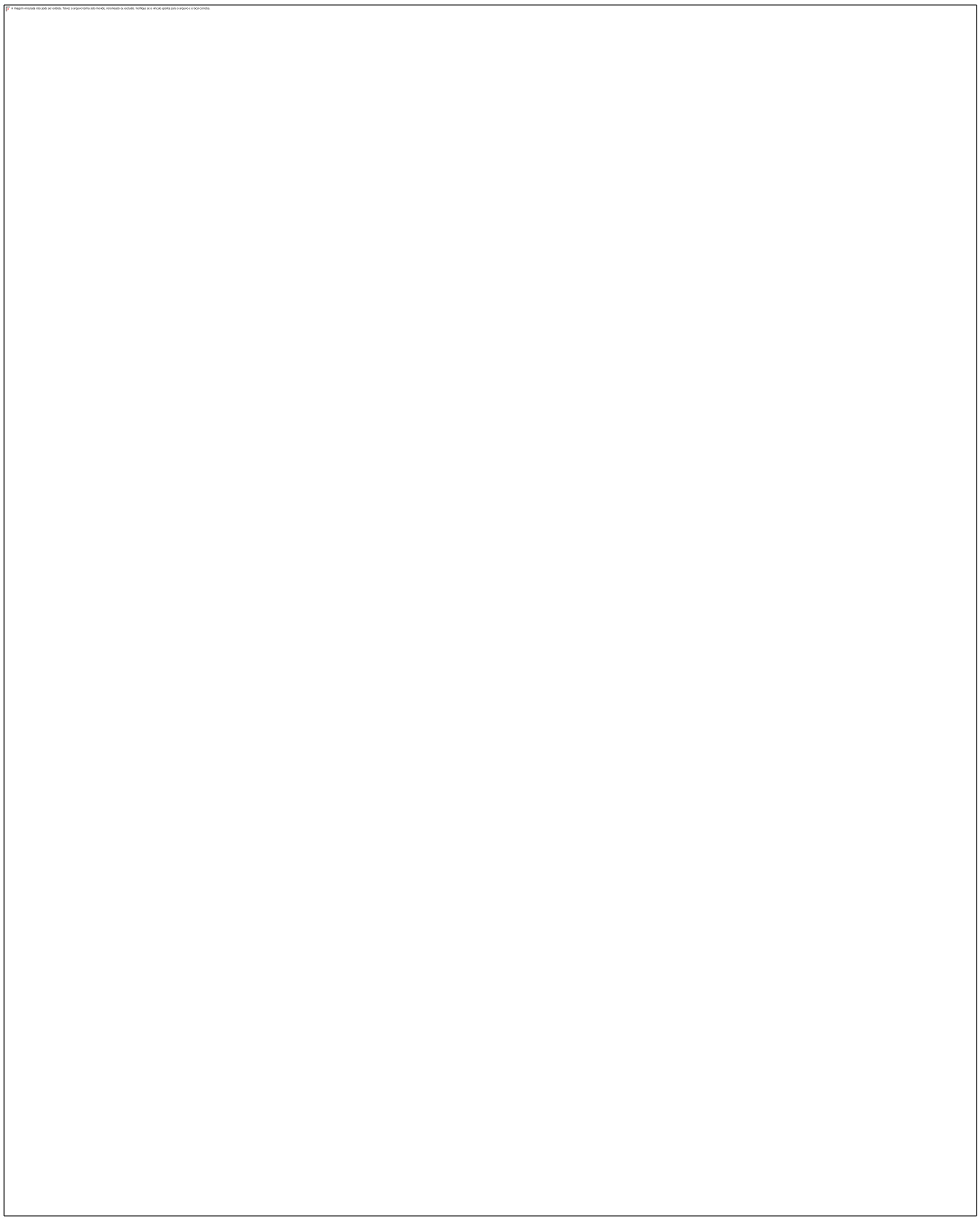


Figura 2: Corte isoplético do diagrama de fases Zn-8%Al-2%Ag.

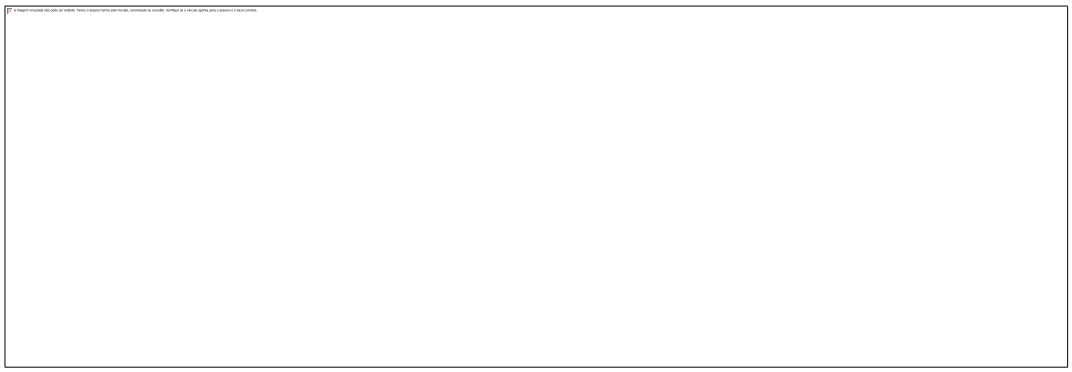


Tabela 1: Reações e temperaturas de transformações de fase na Zn-8%Al-2%Ag a partir do software Thermo-calc.

CÓDIGO: ET0070

AUTOR: TALLES LOHAN DANTAS CARDOSO

ORIENTADOR: FABIO MENEGHETTI UGULINO DE ARAUJO

TÍTULO: Desenvolvimento de Circuitos Controladores para Sistemas de Geração Fotovoltaica

Resumo

O presente trabalho aborda o projeto, a simulação e a validação experimental de um conversor elevador de tensão (topologia Boost) voltado para aplicações em sistemas de geração fotovoltaica off-grid. Partindo de uma fundamentação teórica acerca das principais estruturas de conversão CC-CC (Buck, Boost e Buck-Boost), foram realizados o dimensionamento dos componentes passivos e ativos, simulações em ambiente computacional (LTspice) e montagem de protótipo em protoboard. A geração do sinal de chaveamento ficou a cargo de um microcontrolador Arduino, que também serviu de plataforma para a implementação, em ambiente simulado (Tinkercad), do algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência baseado no método Perturba e Observa (P&O). Os ensaios computacionais confirmaram a coerência entre os valores de ganho de tensão obtidos e os previstos pela teoria, enquanto os testes práticos evidenciaram perdas inerentes ao protótipo, relacionadas a resistências parasitas e características não ideais dos componentes. Os resultados indicam que a integração entre o conversor Boost e a estratégia MPPT P&O constitui uma solução viável e de baixo custo para a maximização da extração de energia em sistemas fotovoltaicos autônomos.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica, Conversores CC-CC, Conversor Boost, MPPT, P&O

TITLE: Development of Controller Circuits for Photovoltaic Generation Systems

Abstract

This work addresses the design, simulation, and experimental validation of a step-up voltage converter (Boost topology) aimed at applications in off-grid photovoltaic generation systems. Starting from a theoretical foundation on the main DC-DC conversion structures—Buck, Boost, and Buck-Boost—the sizing of passive and active components, computational simulations (LTspice), and the assembly of a prototype on a breadboard were carried out. The generation of the switching signal was handled by an Arduino microcontroller, which also served as a platform for the implementation, in a simulated environment (Tinkercad), of the maximum power point tracking algorithm based on the Perturb and Observe (P&O) method. The computational tests confirmed

the consistency between the voltage gain values obtained and those predicted by theory, while practical tests showed inherent losses in the prototype, related to parasitic resistances and non-ideal component characteristics. The results indicate that the integration of the Boost converter with the P&O MPPT strategy constitutes a viable and low-cost solution for maximizing energy extraction in autonomous photovoltaic systems.

Keywords: Photovoltaic Energy, DC-DC Converters, Boost Converter, MPPT, P&O

Introdução

Nas últimas décadas, a demanda crescente por alternativas energéticas menos poluentes tem conduzido a um expressivo avanço no aproveitamento de fontes renováveis em todo o mundo. Dados recentes apontam que, apesar da redução no uso do petróleo para fins de geração elétrica, outras fontes fósseis, como o carvão e o gás natural, ainda respondem por parcela majoritária da produção global de eletricidade, mantendo elevados os índices de emissão de dióxido de carbono (KRONENBERGER et al., 2025). Frente a esse panorama, investir em tecnologias renováveis tornou-se imperativo para mitigar os efeitos adversos sobre o clima (DIAS, 2024).

Dentre as fontes limpas disponíveis, a energia solar fotovoltaica ocupa posição de destaque graças à sua ampla disponibilidade e à possibilidade de emprego em múltiplas escalas, desde instalações residenciais até usinas de grande porte. Relatórios da Agência Internacional de Energia Renovável indicam que a capacidade instalada de geração solar ultrapassou centenas de gigawatts em anos recentes, com projeções de crescimento contínuo até o final da presente década (IRENA, 2023; IEA, 2023). No contexto brasileiro, os elevados níveis de irradiação ao longo do ano, aliados à redução progressiva nos custos de fabricação dos módulos, fazem do país um cenário especialmente favorável para a expansão dessa tecnologia (DA SILVA; ARAÚJO, 2022).

Todavia, a natureza variável da irradiância solar impõe desafios técnicos relevantes. Fenômenos como o sombreamento parcial e as oscilações de temperatura alteram o ponto de operação dos módulos e podem resultar em significativa perda de rendimento (MORITA, 2022). Para contornar essas limitações, sistemas fotovoltaicos, principalmente os do tipo autônomo (off-grid), empregam controladores de carga que gerenciam o fluxo de energia entre o gerador, o banco de baterias e a carga. Quando esses controladores operam com base em estratégias de rastreamento do ponto de máxima potência (Maximum Power Point Tracking - MPPT), é possível extrair, de modo contínuo, a máxima potência disponível no painel sob as condições ambientais vigentes (BUSTOS-MÁRQUEZ et al., 2023).

Os conversores CC-CC constituem o núcleo da eletrônica de potência nesses sistemas, pois são responsáveis por adequar os níveis de tensão e corrente fornecidos pelo módulo às necessidades da carga ou do armazenamento. Diferentes topologias, tais como Buck, Boost e Buck-Boost, oferecem características específicas de ganho, eficiência e complexidade de implementação (PERDONCINI, 2015; SOUSA, 2019). A seleção da topologia mais adequada depende dos requisitos de tensão de entrada e saída, da

potência envolvida e do tipo de controle adotado.

Nesse contexto, o método Perturbação e Observação (P&O) é uma das técnicas MPPT mais difundidas, sendo reconhecido por sua simplicidade de codificação, baixo custo computacional e facilidade de embarque em microcontroladores (BRITO, 2013; ESRAM; CHAPMAN, 2007). O algoritmo rastreia o ponto de máxima potência por meio de pequenas perturbações periódicas no ciclo de trabalho do conversor: caso a perturbação resulte em aumento de potência, ela é mantida na mesma direção; caso contrário, o sentido é invertido.

Um aspecto crítico na implementação do P&O é o dimensionamento do passo de perturbação (Delta D), que estabelece um compromisso de desempenho. Passos maiores aceleram a convergência inicial, porém aumentam as oscilações (ripple) em torno do ponto ótimo em regime permanente, gerando perdas energéticas. Por outro lado, passos menores minimizam o ripple, mas tornam o rastreamento excessivamente lento frente a variações bruscas de irradiância. Assim, apesar de suas limitações frente a dinâmicas rápidas, o P&O oferece excelente relação entre complexidade e eficácia para aplicações práticas.

Metodologia

O presente trabalho tem como objetivo o estudo e o desenvolvimento de um circuito controlador de carga para sistemas fotovoltaicos autônomos, com foco na topologia Boost, na técnica de controle por modulação de largura de pulso (PWM) e na estratégia MPPT baseada no método P&O. O trabalho abrange desde a fundamentação teórica e o dimensionamento dos componentes até a validação computacional e experimental do protótipo, integrando conhecimentos de eletrônica de potência, programação embarcada e instrumentação.

Metodologia

O desenvolvimento deste projeto seguiu uma abordagem progressiva, partindo da revisão teórica, passando por simulações computacionais e culminando na montagem e teste de um protótipo físico. As subseções a seguir descrevem cada uma das etapas metodológicas adotadas.

Revisão Bibliográfica A primeira fase consistiu em uma ampla pesquisa na literatura técnica e científica, conduzida em bases de dados reconhecidas, como o Portal de Periódicos CAPES, IEEE Xplore e Google Acadêmico. Foram empregadas palavras-chave como "sistemas fotovoltaicos", "controladores de carga", "conversores CC-CC", "MPPT" e "Perturba e Observa", priorizando publicações dos últimos dez anos. O levantamento bibliográfico teve três finalidades centrais: (i) consolidar o entendimento acerca das topologias Buck, Boost e Buck-Boost, incluindo seus princípios de funcionamento, equações de transferência e critérios de projeto; (ii) mapear as principais técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência, com destaque para o método P&O e a Condutância Incremental (IC), avaliando suas vantagens, limitações e cenários de aplicação; e (iii) identificar metodologias de teste e boas práticas de implementação em plataformas embarcadas de baixo custo. Essa etapa forneceu a base teórica necessária para as decisões de projeto, fundamentando a escolha da topologia

Boost e do algoritmo P&O como soluções adequadas aos objetivos do trabalho.

Topologias de Conversores CC-CC Nesta etapa, foram estudadas as três topologias clássicas de conversores CC-CC empregadas em sistemas fotovoltaicos: Buck (redutor), Boost (elevador) e Buck-Boost (redutor-elevador). A ênfase recaiu sobre a compreensão do modo como a variação do ciclo de trabalho (D) influencia a relação entre a tensão de entrada (Vin) e a tensão de saída (Vout). As expressões apresentadas a seguir são válidas para o regime de condução contínua (CCM).

Conversor Buck (redutor): O conversor Buck (Figura 1) produz uma tensão de saída inferior à de entrada. A relação de conversão é dada por Vout / Vin = D (Equação 1), enquanto a corrente de saída equivale à corrente no indutor, conforme Iout = IL (Equação 2) (MAKERHERO, 2022).Conversor Boost (elevador): O conversor Boost (Figura 2) fornece uma tensão de saída superior à de entrada, sendo particularmente útil quando a tensão do módulo fotovoltaico é insuficiente para alimentar a carga diretamente. As relações de conversão são expressas por Vout / Vin = 1 / (1 - D) (Equação 3) e IL / Iout = 1 / (1 - D) (Equação 4) (MAKERHERO, 2022).Conversor Buck-Boost (redutor-elevador): O conversor Buck-Boost (Figura 3) possibilita tanto a elevação quanto a redução da tensão, porém a polaridade da saída é invertida em relação à entrada. Suas equações de transferência são apresentadas por Vout / Vin = D / (1 - D) (Equação 5) e IL / Iout = 1 / (1 - D) (Equação 6) (MAKERHERO, 2022).

Dentre as topologias avaliadas, o conversor Boost foi selecionado para a implementação prática por atender aos requisitos de elevação de tensão do projeto sem a complexidade adicional da inversão de polaridade presente no Buck-Boost. O conversor Buck, embora compreendido e estudado, não se aplicava diretamente ao cenário proposto, uma vez que a tensão do módulo fotovoltaico precisava ser elevada para alimentar a carga.

Plataformas e Ferramentas de Desenvolvimento A escolha das ferramentas de trabalho priorizou a acessibilidade, a facilidade de uso e a ampla documentação disponível, características desejáveis no ambiente acadêmico. Arduino Uno: selecionado como plataforma de prototipagem embarcada, responsável pela geração do sinal PWM de chaveamento do MOSFET. A programação foi realizada em C/C++ por meio da IDE oficial do Arduino. Além do controle do ciclo de trabalho, o microcontrolador também foi utilizado como base para a codificação do algoritmo P&O em ambiente simulado. Tinkercad: ambiente de simulação on-line empregado para validar os códigos desenvolvidos para o Arduino. Nessa plataforma, foi implementada a lógica do algoritmo P&O, permitindo observar a resposta do ciclo de trabalho a variações simuladas de tensão e corrente, como se o painel estivesse sujeito a alterações de irradiância e temperatura. A Figura 4 ilustra um dos testes conduzidos. LTspice: software de simulação de circuitos utilizado para analisar o comportamento dinâmico do conversor Boost, incluindo resposta transitória, ripple de tensão e corrente, e ganho de tensão em regime permanente. EasyEDA: plataforma de projeto eletrônico empregada para a esquematização do circuito e o planejamento do layout antes da montagem física. A combinação dessas ferramentas possibilitou uma abordagem integrada, na qual cada etapa de simulação alimentou a etapa subsequente com dados e verificações, reduzindo riscos na montagem do protótipo.

Dimensionamento dos Componentes do Conversor Boost O projeto do conversor Boost partiu das especificações elétricas do módulo fotovoltaico adotado como fonte primária.

A Tabela 1 resume as características técnicas do painel (Potência máxima: 30 Wp, Tensão de máxima potência: 18,54 V, Corrente de máxima potência: 1,62 A, Tensão de circuito aberto: 22,68 V, Corrente de curto-circuito: 1,76 A, Eficiência do módulo: 12,79%). Os componentes foram calculados conforme os critérios descritos a seguir:

Resultados e Discussões

Indutor (L): projetado para assegurar a operação em regime de condução contínua (CCM), limitando a ondulação de corrente a valores aceitáveis. A indutância mínima necessária é obtida por L = (Vin * D) / (Delta IL * fs) (Equação 7), onde Vin é a tensão de entrada, D é o ciclo de trabalho, Delta IL é a ondulação máxima admissível na corrente do indutor e fs é a frequência de chaveamento.Capacitores de entrada e saída (C): dimensionados para atenuar as oscilações de tensão decorrentes do chaveamento do MOSFET. Na entrada, o objetivo é estabilizar a tensão fornecida pelo painel; na saída, busca-se minimizar o ripple de tensão entregue à carga. O valor do capacitor é determinado por C = (Iout * D) / (Delta VC * fs) (Equação 8), onde Iout é a corrente de saída e Delta VC é a ondulação de tensão tolerável.Diodo Schottky (1N5819): escolhido em razão de sua reduzida queda de tensão direta e da elevada velocidade de comutação, atributos que contribuem para a minimização das perdas em frequências de chaveamento elevadas.MOSFET (IRF2805): selecionado por apresentar baixa resistência de condução e capacidade de corrente superior à máxima fornecida pelo módulo, garantindo margem de segurança durante a operação. A Tabela 2 sintetiza os valores adotados para cada componente do conversor (Indutor: 100 uH; Capacitor de entrada: 330 uF; Capacitor de saída: 330 uF; Resistor de carga: 50 ohms; MOSFET: IRF2805 60 V/10 A; Diodo Schottky: 1N5819 60 V/3 A).

Montagem do Protótipo Antes da montagem física, o circuito foi esquematizado na plataforma EasyEDA (Figura 5), etapa que permitiu verificar as conexões elétricas e organizar a disposição dos componentes. A construção do protótipo foi realizada em protoboard, o que facilitou a substituição e o reposicionamento de componentes ao longo dos ensaios (Figura 6). Uma fonte de bancada ajustável foi empregada no lugar do painel fotovoltaico, fornecendo tensão e corrente controladas para os testes. O microcontrolador Arduino foi conectado ao circuito com a função de gerar o sinal PWM responsável pelo chaveamento do MOSFET. A variação do ciclo de trabalho foi controlada manualmente por meio de um potenciômetro acoplado à entrada analógica do Arduino.

Procedimento Experimental Os ensaios práticos tiveram como meta verificar a operação do conversor Boost e comparar os valores de tensão medidos com as predições teóricas. O Arduino gerava o sinal de chaveamento em frequência fixa, enquanto o ciclo de trabalho era ajustado pelo potenciômetro. Para cada configuração de D, a tensão de saída era registrada com o auxílio de um multímetro digital, permitindo avaliar a coerência entre o ganho de tensão obtido e o esperado pela equação do conversor Boost ideal. Paralelamente, o algoritmo P&O foi validado por meio de simulações no Tinkercad, nas quais valores de tensão e corrente eram variados artificialmente para reproduzir cenários de mudança de irradiância. A lógica de decisão do algoritmo, perturbar o ciclo de trabalho e observar a variação de potência resultante, foi verificada quanto à convergência ao ponto de máxima potência.

Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados obtidos em duas frentes complementares: as simulações computacionais no LTspice e os ensaios realizados com o protótipo físico. A confrontação entre o ambiente idealizado da simulação e as condições reais de operação é essencial para compreender o impacto das não idealidades dos componentes sobre o desempenho do conversor.

Simulações no LTspice O conversor Boost foi modelado no LTspice empregando os mesmos componentes e valores de projeto utilizados no protótipo (Figura 7). Os parâmetros de simulação foram configurados da seguinte forma: Indutor (100 uH), Capacitor de entrada (330 uF), Capacitor de saída (330 uF), Resistência de carga (50 ohms), MOSFET IRF2805, Diodo Schottky 1N5819 e Sinal de comando (pulso PWM com período de 20 us - frequência de 50 kHz). Para um conversor Boost ideal, a tensão de saída relaciona-se à tensão de entrada segundo a Equação 9: Vout = Vin / (1 - D). As simulações foram executadas durante 100 ms, intervalo suficiente para observar tanto o transitório inicial quanto a estabilização em regime permanente. Os testes foram conduzidos com ciclo de trabalho fixo em 50% (D = 0,5), variando-se a tensão de entrada. Cenário 1 - Vin = 0,9 V: a teoria prevê Vout aproximadamente igual a 1,8 V. A simulação confirmou a estabilização da tensão de saída em valor coerente com o esperado, conforme ilustrado na Figura 8. Cenário 2 - Vin = 5 V: neste caso, o valor teórico esperado era Vout aproximadamente igual a 10 V. Os resultados da simulação, apresentados na Figura 9, confirmaram a adequação do dimensionamento, com a tensão de saída atingindo o patamar previsto. Os resultados computacionais validaram o projeto do conversor, demonstrando que os componentes selecionados operam de acordo com as previsões teóricas para diferentes tensões de entrada.

Ensaios com o Protótipo Físico Na etapa experimental, a tensão de entrada foi fornecida por uma fonte de bancada, enquanto o sinal PWM era gerado pelo Arduino. Foram realizados ensaios sob diferentes valores de ciclo de trabalho e tensão de entrada. Em um dos ensaios representativos (Figura 10), aplicou-se uma tensão de entrada de aproximadamente 3,5 V com ciclo de trabalho de 50%. Pela equação teórica, a saída esperada seria próxima de 7 V; entretanto, o valor medido foi de cerca de 6 V, revelando uma perda de aproximadamente 1 V. A discrepância entre os valores teóricos e experimentais pode ser atribuída a diversos fatores inerentes ao protótipo:

Resistências parasitas dos condutores e das trilhas da protoboard;Queda de tensão no diodo Schottky, que, embora reduzida, não é nula;Perdas de condução e comutação no MOSFET;Indutâncias e capacitâncias parasitas introduzidas pela montagem em protoboard. Ensaios adicionais, conduzidos sob diferentes condições de entrada, apresentaram comportamento semelhante, confirmando que as perdas são consistentes e previsíveis, decorrentes das características não ideais dos componentes e do meio de montagem.

Validação do Algoritmo MPPT P&O em Simulação A estratégia de rastreamento do ponto de máxima potência baseada no método Perturbação e Observação (P&O) foi codificada em C/C++ e validada no ambiente Tinkercad. O algoritmo opera segundo a seguinte lógica: a cada ciclo de amostragem, o ciclo de trabalho é ligeiramente perturbado (incrementado ou decrementado); em seguida, a potência resultante é calculada a partir das leituras de tensão e corrente. Se a potência aumentou em relação à

medição anterior, a perturbação segue na mesma direção; caso contrário, o sentido é invertido. Dessa forma, o sistema converge iterativamente para o ponto de operação que maximiza a potência extraída do módulo. Nos testes simulados, valores de tensão e corrente foram variados para reproduzir cenários de alteração de irradiância solar. O algoritmo demonstrou capacidade de ajustar o ciclo de trabalho de forma autônoma, convergindo para regiões de maior potência e respondendo às mudanças impostas, conforme registrado na Figura 4. Cabe ressaltar que o desempenho observado em regime permanente no P&O reflete uma limitação intrínseca ao método de passo fixo. As contínuas perturbações impostas ao ciclo de trabalho geram oscilações de potência em torno do ponto ótimo. Além disso, em cenários de variações bruscas de irradiância, o algoritmo pode apresentar dificuldades em acompanhar o deslocamento do ponto de máxima potência de forma tão veloz e suave quanto técnicas inteligentes (Lógica Fuzzy ou Redes Neurais). Contudo, a validação em simulação confirmou que o P&O atende aos requisitos do projeto, atestando a viabilidade de sua integração ao controlador de carga baseado no conversor Boost para futuras implementações em hardware real, destacando-se pela extrema simplicidade e baixo custo computacional.

Conclusão

O trabalho desenvolvido permitiu consolidar, de forma teórica e experimental, o projeto de um conversor Boost aplicado a sistemas fotovoltaicos autônomos, bem como a validação computacional de uma estratégia de rastreamento do ponto de máxima potência baseada no método Perturbação e Observação (P&O).

O estudo das topologias Buck, Boost e Buck-Boost proporcionou a compreensão das relações de ganho, dos modos de condução e dos critérios de seleção de cada estrutura, fundamentando a escolha do Boost como a topologia mais adequada ao cenário de elevação de tensão requerido. As simulações no LTspice confirmaram a coerência entre os resultados numéricos e as previsões analíticas, validando o dimensionamento dos componentes.

Os ensaios com o protótipo evidenciaram o funcionamento do conversor em condições reais, embora as perdas observadas, associadas a resistências parasitas, queda no diodo Schottky e limitações da protoboard, tenham resultado em discrepâncias em relação ao modelo ideal. Tais diferenças, contudo, são esperadas e reforçam a importância de considerar as não idealidades dos componentes durante a fase de projeto.

O algoritmo P&O, testado em ambiente simulado, demonstrou eficácia na convergência ao ponto de máxima potência sob condições variáveis de irradiância, confirmando sua adequação para embarque em microcontroladores de baixo custo.

Como perspectivas para trabalhos futuros, destacam-se: (i) a implementação do algoritmo MPPT diretamente no protótipo físico, integrando sensores de corrente e tensão ao loop de controle; (ii) a migração da montagem para placa de circuito impresso (PCI), visando à redução de perdas parasitas; (iii) o emprego de componentes com menores perdas de condução; e (iv) a investigação de técnicas MPPT mais avançadas, como Condutância Incremental e abordagens baseadas em inteligência artificial (fuzzy

logic e redes neurais), de modo a elevar a robustez e a eficiência global do sistema fotovoltaico.

Referências

BRITO, Moacyr Aureliano Gomes de. Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilhamento, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira, 2013.

BUSTOS-MÁRQUEZ, Luis F.; SEPÚLVEDA-MORA, Sergio B.; GUEVARA-IBARRA, Dinael; MEDINA-DELGADO, Byron. Controlador de carga MPPT con método de estimación del estado de carga basado en conteo de amperios hora y voltaje a circuito abierto. Ingeniería, v. 28, n. 2, p. 1–19, 2023.

DA SILVA, Heitor Marques Francelino; ARAÚJO, Francisco José Costa. Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 8, n. 3, p. 859–869, 2022.

DIAS, Reinaldo. O papel das energias renováveis no cumprimento dos ODS: oportunidades e desafios. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, v. 5, n. 1, p. e514845, 2024.

ESRAM, Trishan; CHAPMAN, Patrick L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 22, n. 2, p. 439–449, 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2023. 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023. Acesso em: 24 abr. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Solar Energy – Overview. 2023. Disponível em: https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy. Acesso em: 22 abr. 2026.

KRONENBERGER, Giovan; DO BRASIL, Vanessa Índio; DE MIRANDA, Maria Geralda. Panorama da geração elétrica e das emissões de gases de efeito estufa no atual cenário de transição energética. Revista FOCO, v. 18, n. 2, p. e7641, 2025.

MAKERHERO. Como funciona um conversor de tensão DC-DC? 2022. Disponível em: https://www.makerhero.com/blog/como-funciona-um-conversor-de-tensao-dc-dc/. Acesso em: 21 ago. 2026.

MORITA, Vinícius Akio. Simulação de perdas de desempenho em um sistema de geração fotovoltaica. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

PERDONCINI, João Francisco. Conversor CC-CC para aplicação fotovoltaica. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

SOUSA, Silas Martins. Controle de conversor CC/CC SEPIC em modo corrente aplicado ao inversor fotovoltaico trifásico conectado à rede elétrica. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São João del-Rei, 2019.

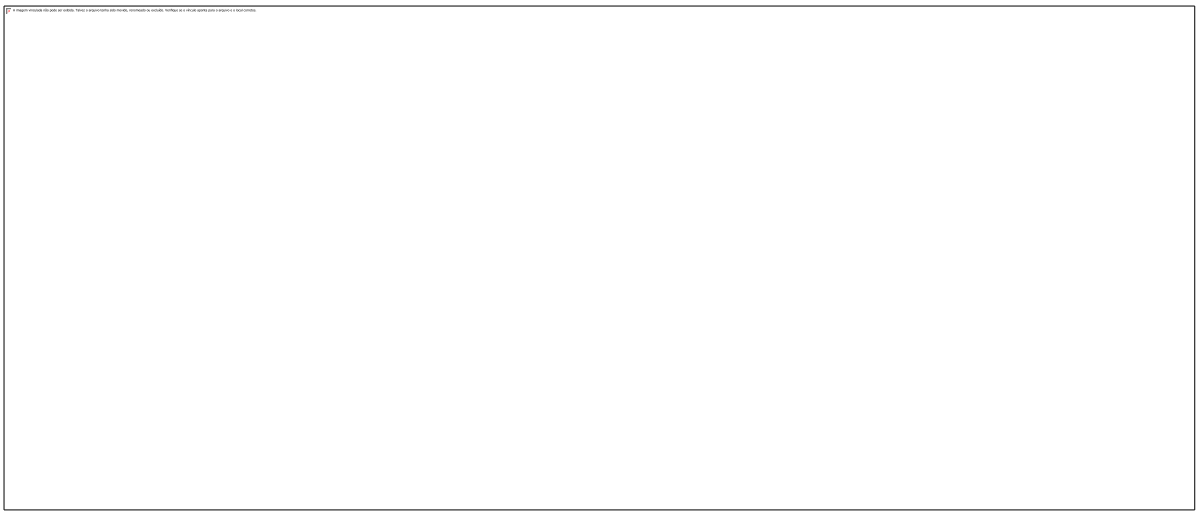
Anexos



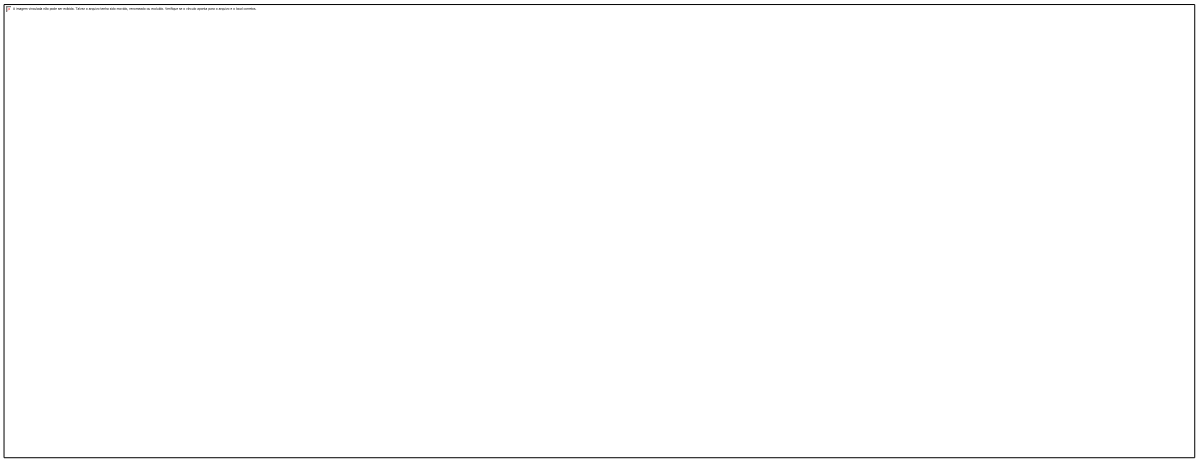
Esquema do conversor Buck. Fonte: [10]



Esquema do conversor Boost. Fonte: [10].



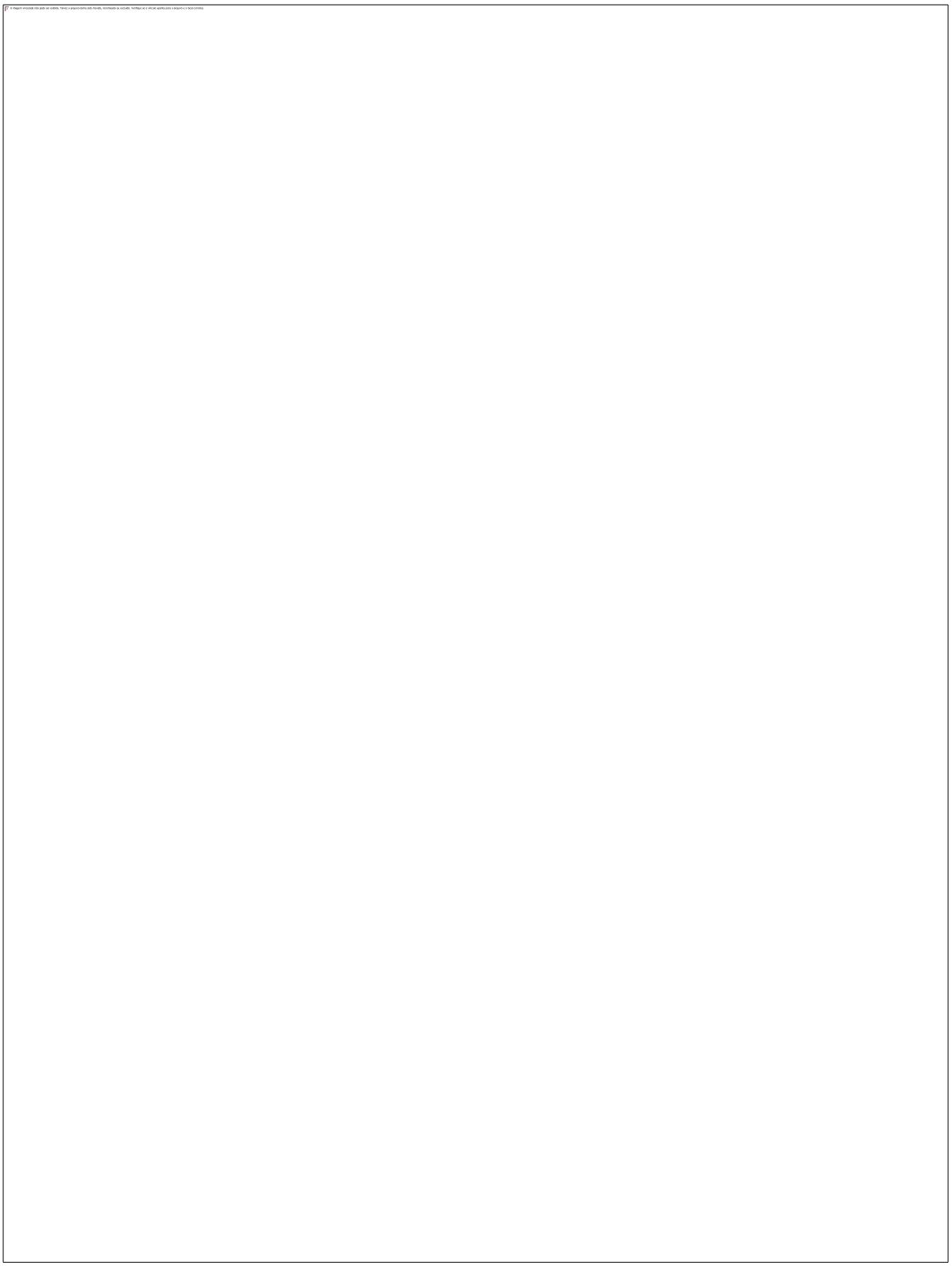
Esquema do conversor Buck-Boost. Fonte: [10].



Validação do algoritmo P&O no Tinkercad. Fonte: elaborado pelos autores.



Esquemático do conversor Boost desenvolvido no EasyEDA. Fonte: elaborado pelos autores.



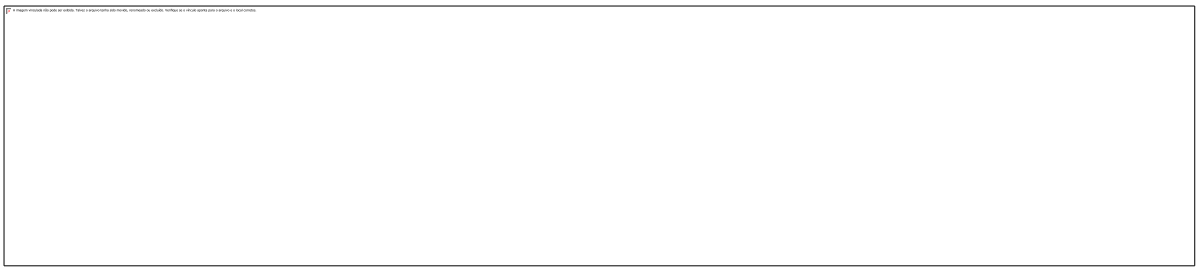
Protótipo montado em protoboard. Fonte: elaborado pelos autores.



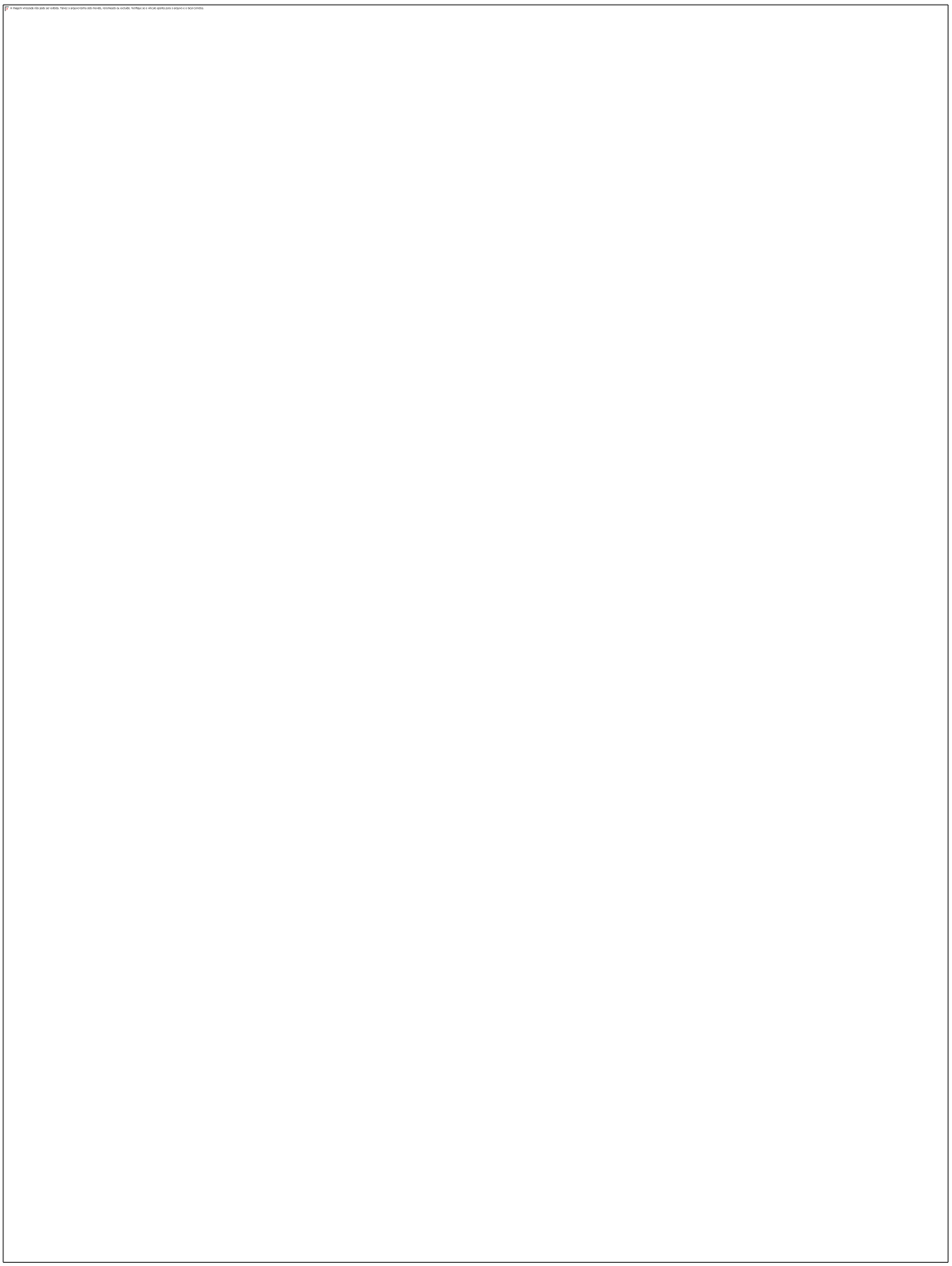
Circuito do conversor Boost modelado no LTspice. Fonte: elaborado pelos autores.



Resposta do conversor para Vin =0,9V e D = 50%. Fonte: elaborado pelos autores.



Resposta do conversor para Vin = 5V e D = 50%. Fonte: elaborado pelos autores.



Teste prático com Vin =3,5V e D = 50%. Fonte: elaborado pelos autores.

CÓDIGO: ET0071

AUTOR: STEPHANY RODRIGUES VIEIRA

ORIENTADOR: FABIO MENEGHETTI UGULINO DE ARAUJO

TÍTULO: Estudo de Estratégias MPPT em Controladores de Carga Microcontrolados

Resumo

Este relatório apresenta o estudo, dimensionamento e implementação de estratégias de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) aplicadas a sistemas de geração solar fotovoltaica por meio de um conversor SEPIC. O objetivo do trabalho consistiu em analisar e comparar o desempenho dinâmico de métodos clássicos, como o Perturba e Observa (P&O), e de técnicas baseadas em Inteligência Artificial, especificamente a Lógica Fuzzy. A metodologia englobou a validação prática do hardware do conversor e simulações computacionais no ambiente MATLAB/Simulink para a avaliação rigorosa da malha de controle sob perfis de variação de temperatura e irradiância. Os resultados atestaram a viabilidade da topologia SEPIC para a adaptação de impedância, com ganho experimental condizente à teoria, mediante perdas resistivas. Além disso, evidenciaram a expressiva superioridade do controlador Fuzzy, que, em contraste ao P&O, alcançou uma estabilidade em regime estacionário, mitigando as oscilações e maximizando a eficiência da extração de potência sob condições climáticas dinâmicas.

Palavras-chave: Energia Solar, MPPT, Conversor SEPIC, Lógica Fuzzy, Microcontrolador

TITLE: Study of MPPT Strategies in Microcontroller-Based Charge Controllers

Abstract

This report presents the study, design, and implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) strategies applied to photovoltaic solar power generation systems using a SEPIC converter. The objective of this work was to analyze and compare the dynamic performance of classical methods, such as Perturb and Observe (P&O), and Artificial Intelligence-based techniques, specifically Fuzzy Logic. The methodology included practical validation of the converter hardware and computational simulations in the MATLAB/Simulink environment for a rigorous evaluation of the control loop under varying temperature and irradiance profiles. The results confirmed the feasibility of the

SEPIC topology for impedance matching, with an experimentally obtained gain consistent with the theoretical analysis, accounting for resistive losses. Furthermore, the results demonstrated the significant superiority of the Fuzzy controller, which, compared to P&O, achieved greater steady-state stability, mitigating oscillations and maximizing power extraction efficiency under dynamic climatic conditions.

Keywords: Solar Energy, MPPT, SEPIC Converter, Fuzzy Logic, Microcontrollers.

Introdução

O avanço na busca por fontes energéticas renováveis, impulsionado pela urgência em mitigar os impactos ambientais decorrentes dos combustíveis fósseis, consolidou a geração fotovoltaica como um dos pilares da transição energética global. No cenário nacional, em 2024, o Brasil alcançou o marco histórico de 50 GW de capacidade instalada operacional, considerando a soma das modalidades de geração centralizada e distribuída. Com esse avanço, o país ascendeu à 6ª posição no ranking global de potência solar instalada e consolidou a fonte fotovoltaica como a segunda maior da matriz elétrica nacional, representando aproximadamente 20,7% de sua capacidade total [1].

Além desse marco histórico, o setor fotovoltaico brasileiro manteve sua trajetória de crescimento acelerado. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o país atingiu aproximadamente 68 GW de capacidade solar instalada no início de 2026, superando antecipadamente as projeções da *International Energy Agency* (IEA) para o ano de 2027. Essa expansão consolidou a fonte solar como a segunda maior da matriz elétrica nacional, ultrapassando 23% de representatividade na capacidade total do país [2].

Contudo, a despeito dos benefícios inerentes à energia solar, persistem entraves técnicos associados ao rendimento energético dos painéis. A baixa eficiência na conversão de energia, intensificada por oscilações de temperatura, irradiância e variações operacionais, demanda o desenvolvimento de soluções capazes de maximizar o aproveitamento da potência gerada pelos módulos [3].

Com o propósito de otimizar a extração da energia solar, conversores CC-CC ou CC-CA são empregados como interface de potência entre o arranjo fotovoltaico e a carga. Para assegurar a efetividade do sistema, tais conversores devem apresentar elevado rendimento elétrico, com taxas tipicamente superiores a 94%. Nesse âmbito, aplicam-se estratégias de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) que ajustam dinamicamente a razão cíclica dos semicondutores de potência, garantindo a operação contínua no Ponto de Máxima Potência (MPP) frente a variações operacionais e ambientais [4].

O avanço dos sistemas fotovoltaicos tem impulsionado o desenvolvimento de diferentes técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT), que apresentam distintos níveis de complexidade, velocidade, precisão e robustez diante das variações de irradiância e temperatura. Os métodos clássicos, como Perturba e Observa (P\&O), Condutância Incremental (InC) e técnicas baseadas em frações da tensão de circuito aberto ou da corrente de curto-circuito, permanecem amplamente utilizados devido à simplicidade, facilidade de implementação e baixo custo computacional [5, 6]. Em

contrapartida, técnicas inteligentes apresentam maior capacidade de adaptação a condições operacionais complexas, embora geralmente exijam maior esforço de projeto, ajuste de parâmetros e recursos computacionais [7].

Estratégias baseadas em Inteligência Artificial têm conquistado espaço significativo. Entre elas, os sistemas baseados em Lógica Fuzzy destacam-se por sua capacidade intrínseca de gerenciar não linearidades, incertezas e variações operacionais sem a necessidade de um modelo matemático exato do sistema. Fundamentada inicialmente por Zadeh [8], a lógica fuzzy tem sido aplicada com êxito em problemas energéticos.

O presente plano de trabalho tem como objetivo investigar, implementar e avaliar comparativamente estratégias de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) aplicadas a sistemas fotovoltaicos conectados a um conversor SEPIC.

Metodologia

A metodologia delineada para este plano de trabalho dá continuidade às atividades de pesquisa voltadas ao desenvolvimento e aprimoramento de estratégias de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT). A abordagem adotada caracteriza-se por um viés teórico-prático, baseando-se no dimensionamento analítico e implementação do protótipo SEPIC, simulação computacional do sistema e integração das estratégias clássicas e inteligentes de MPPT.

Desenvolvimento e Implementação do Protótipo SEPIC

A primeira etapa prática do trabalho consiste no dimensionamento analítico e na construção de um conversor SEPIC. O projeto é norteado pelas especificações elétricas de um módulo fotovoltaico e pelos critérios de desempenho que visam à estabilidade do sistema e à integridade dos componentes de potência. Para garantir a confiabilidade do hardware, os valores nominais são escolhidos com uma margem de segurança superior aos parâmetros calculados, considerando também a disponibilidade de componentes com baixas perdas parasitas.

A Tabela 1 apresenta a comparação entre os valores projetados e as especificações dos componentes efetivamente utilizados no protótipo.

Após a validação do dimensionamento, procedeu-se à implementação física do conversor SEPIC. O diagrama elétrico completo do protótipo, incluindo as conexões de potência e o circuito de acionamento (driver), é ilustrado na Figura 1.

O protótipo foi montado em bancada experimental (Figura 2), utilizando componentes discretos. O elemento-chave do conversor, o MOSFET IRF3205, é acionado por meio do

driver de gate IR2104, com o sinal de controle PWM fornecido pelo microcontrolador operando em alta frequência.

Simulação Computacional

Com o objetivo de validar o dimensionamento teórico do conversor SEPIC e avaliar o comportamento das lógicas MPPT em regime permanente e transitório, foi desenvolvida uma simulação computacional no ambiente MATLAB/Simulink. Essa etapa permitiu avaliar previamente o desempenho do sistema, reduzindo riscos na implementação prática.

O modelo do sistema (Figura 3) foi construído a partir da integração do modelo do módulo fotovoltaico, indutores, capacitores, diodo, chave semicondutora e carga resistiva.

Durante a simulação, são adotados os mesmos parâmetros utilizados no dimensionamento analítico. O sistema é submetido a perfis de variação de irradiância e temperatura, permitindo coletar dados dinâmicos e comparar as abordagens de MPPT em cenários idênticos de testes, avaliando-se métricas como eficiência de extração, oscilações e tempo de acomodação.

Implementação do Algoritmo Perturba e Observa (P&O)

O controlador baseado no método P&O atua como parâmetro de referência entre as técnicas clássicas. O algoritmo foi implementado calculando a potência instantânea do arranjo fotovoltaico a partir das medições de tensão e corrente. O algoritmo compara a potência atual com a potência obtida no instante anterior e, com base nessa variação, determina se o ciclo de trabalho do conversor deve ser aumentado ou reduzido.

O processo opera de forma iterativa, aplicando a cada passo uma pequena variação incremental no duty cycle (Figura 4). Essa variação é definida por um passo fixo (ΔD), escolhido de modo a equilibrar rapidez de convergência e redução das oscilações em torno do Ponto de Máxima Potência (MPP).

Na prática, a lógica condicional foi estruturada para avaliar concomitantemente as variações de potência (ΔP) e tensão (ΔV) para definir a direção exata da perturbação e atualizar o ciclo de trabalho aplicado ao conversor SEPIC.

Desenvolvimento do Controlador Baseado em Lógica Fuzzy

A abordagem baseada em inteligência artificial visa conferir ao controlador maior adaptação perante não linearidades. O Controlador de Lógica *Fuzzy* (FLC) consiste essencialmente na implementação das operações de fuzzificação, mecanismo de inferência e defuzzificação. O núcleo do sistema de inferência tipo Mamdani é estruturado de acordo com a Figura 5.

O controlador opera com duas variáveis linguísticas de entrada:

Erro (e): Definido a partir da inclinação da curva característica P-V do arranjo fotovoltaico (e(k) = dP/dV). Ele indica a posição do ponto de operação em relação ao MPP.

Variação do erro (Δe): Representa a diferença entre valores consecutivos do erro (Δe(k) = e(k) - e(k-1)), fornecendo a tendência dinâmica de deslocamento.

A variável de saída corresponde ao incremento do ciclo de trabalho (ΔD). Para representar os graus de pertinência dessas variáveis, utilizou-se uma granularidade de cinco conjuntos fuzzy: Negativo Grande (NG), Negativo Pequeno (NP), Zero (ZE), Positivo Pequeno (PP) e Positivo Grande (PG), empregando funções de pertinência do tipo triangular e trapezoidal.

A base de regras (mecanismo de inferência) é construída de forma heurística, composta por 25 regras operadas pelo critério mínimo/máximo, definindo as ações de controle proporcionais ao estado do sistema. Por fim, a defuzzificação adota o método do centro de gravidade (centroide), que fornece uma saída de controle incremental contínua, suave e limitadora do ripple em regime estacionário, otimizando a eficiência de rastreio durante transientes solares.

Resultados e Discussões

Nesta seção são apresentados e analisados os resultados obtidos nas etapas de simulação computacional e implementação experimental do conversor SEPIC, além de uma análise detalhada do desempenho dinâmico das estratégias de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT).

Validação Experimental do Protótipo SEPIC

A simulação e posterior implementação em bancada serviram como base para a validação do dimensionamento dos componentes do conversor. Considerando uma carga resistiva de 20 Ω, verificou-se que a condição teórica de máxima transferência de potência ocorre para uma razão cíclica de aproximadamente D = 0,573. A Figura 6 apresenta a evolução temporal das potências de entrada e saída, ilustrando que, sob condições ideais simuladas, o conversor realiza a transferência com elevada eficiência, não apresentando perdas (potências convergindo para 30 W).

Durante os ensaios práticos com a placa montada, foram realizadas análises variando a tensão de entrada e a razão cíclica. A análise revelou desvios em relação ao modelo ideal devido a perdas associadas aos componentes físicos (chaves, diodos e elementos passivos).

O comportamento do ganho estático do conversor, definido por G = Vout/Vin = D/(1-D), é apresentado na Figura 7. Observa-se que os resultados experimentais acompanham a tendência teórica, mas os ganhos práticos permanecem inferiores, desvio que se acentua para razões cíclicas mais elevadas (ex: D = 0,60). Esse efeito corrobora a presença e a influência das não-idealidades resistivas e de chaveamento no protótipo construído.

Desempenho Dinâmico das Estratégias MPPT

Para avaliar o desempenho e a adaptabilidade das técnicas de controle (P&O e Lógica Fuzzy), os controladores foram submetidos a cenários de estresse operacional, simulando as variações ambientais inerentes aos sistemas fotovoltaicos.

Em condições nominais (1000 W/m² e 25°C), ambos os métodos garantiram alta eficiência (próxima a 99,9%), conseguindo convergir a potência extraída para valores idênticos ao máximo referencial (1050 W). A Tabela 2 exibe as métricas de resposta inicial dos controladores, onde a lógica Fuzzy obteve leve vantagem no tempo de subida.

Para aprofundar o comparativo, foi traçado o cenário 1, que submete o painel a uma elevação gradual de temperatura (de 20°C até 50°C). Conforme evidenciado na Tabela 3, a principal distinção está na estabilidade do regime permanente:

Enquanto o P&O mantém uma perturbação constante e alta oscilação (gerando perdas elétricas), o FLC é capaz de zerar sua variação incremental ao atingir a vizinhança do MPP. Essa estabilidade confere à IA a capacidade de atenuar o ripple drasticamente (0,029 W contra 2,934 W). A resposta dos controladores P&O e fUZZY sob essa rampa térmica (Figura 9 e Figura 10) atesta como a curva do controlador Fuzzy transita de forma muito mais suave e fiel à máxima potência de referência do que a ruidosa convergência do clássico P&O.

Adicionalmente, foi estruturado o Cenário 2, voltado para a análise do sistema frente a variações bruscas de irradiância solar (emulando sombreamento parcial passageiro ou nuvens densas), mantendo a temperatura constante. A irradiância foi reduzida abruptamente de 1000 W/m² para 500 W/m² e, em seguida, elevada para 800 W/m². A Tabela 4 sumariza o tempo de recuperação e as perdas dinâmicas durante essas transições:

Neste cenário de mudança abrupta, a vulnerabilidade do algoritmo P&O tornou-se ainda mais proeminente, apresentando confusão direcional inicial (desvio temporário do MPP) e uma longa recuperação, além de intensificar o ripple. O controlador Fuzzy, por sua vez, demonstrou a robustez inerente às técnicas de IA: ao identificar a drástica variação do erro, a inferência ajustou rapidamente a razão cíclica com passos maiores. As Figuras 11 e 12 mostram as curvas dos controladores P&O e Fuzzy, respectivamente, e ilustram a superioridade dinâmica do FLC, que atinge o novo patamar ótimo quase instantaneamente.

Em suma, os resultados ratificam não apenas o sucesso na concepção e validação do protótipo SEPIC para a adaptação de impedância, como também demonstram o salto qualitativo em estabilidade e eficiência que a inteligência computacional, por meio da lógica Fuzzy, provê ao rastreamento fotovoltaico.

Conclusão

Este trabalho teve como objetivo projetar, simular e implementar experimentalmente um conversor SEPIC aplicado a sistemas fotovoltaicos, bem como avaliar comparativamente o desempenho de diferentes estratégias de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) sob cenários dinâmicos.

A modelagem analítica e a subsequente construção em bancada do protótipo SEPIC confirmaram a viabilidade da topologia na adaptação de impedância entre painel e carga. Os ensaios validaram o ganho estático simulado, embora tenham exposto as esperadas degradações de rendimento oriundas de não idealidades (perdas resistivas e de chaveamento) dos componentes físicos, iterando a pertinência de superdimensionamentos por segurança na área de eletrônica de potência.

No escopo computacional e de controle inteligente, todas as abordagens cumpriram satisfatoriamente o papel de buscar e sustentar o Ponto de Máxima Potência (MPP) em operação nominal. No entanto, perante transientes contínuos do cenário de estresse, a dicotomia entre as lógicas ficou evidente. O método de Perturba e Observa (P&O), apesar do apelo da simplicidade de codificação, incorreu em expressivos ripples de energia, induzidos por seu degrau constante de busca. Em contraponto, o controlador alicerçado em Lógica Fuzzy manifestou uma convergência excepcionalmente limpa e estabilizada. O amparo da lógica difusa revelou-se imune às oscilações de regime estacionário, provendo a atenuação quase total da ondulação de potência.

Por fim, conclui-se que os propósitos fundamentais da pesquisa foram alcançados. Ao amalgamar as etapas de dimensionamento físico de conversores CC-CC com a embarcação de métodos clássicos e contemporâneos de otimização, o relatório solidifica o fato de que a inserção de recursos baseados em Inteligência Artificial não apenas viabiliza um manejo robusto sobre as imprevisibilidades solares, mas consolida-se como preceito imprescindível para galgar as máximas eficiências nas matrizes renováveis.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a implementação experimental dos algoritmos MPPT inteligentes em uma plataforma embarcada integrada ao protótipo SEPIC, permitindo a validação dos resultados simulados em um ambiente operacional físico com módulos fotovoltaicos reais. Sugere-se, ainda, a investigação do sistema sob condições de sombreamento parcial, cenário no qual as técnicas baseadas em Inteligência Artificial podem ser aprimoradas para rastrear o pico global de potência, contornando as limitações de convergência das abordagens tradicionais.

Referências

[1] MME - Ministério de Minas e Energia. Dados oficiais de capacidade instalada da matriz elétrica nacional. (2024).

[2] SILVA, Anne. 68 gigawatts de energia: Brasil alcança marco mundial e ultrapassa previsões de capacidade solar instalada. 2026. Disponível em: https://revistaforum.com.br/brasil/68-gigawatts-de-energia-brasil-alcanca-marco-mundial-e-ultrapassa-previsoes-de-capacidade-solar-instalada/

[3] MATA, Gabriel Antônio Barros da. Comparação de conversores cc-cc para otimização da geração de energia solar fotovoltaica através do rastreamento da máxima potência. 2025.

[4] VASCONCELLOS, G. L. D. Comparação de topologias de conversores CC-CC flyback com grampeamento ativo para aplicações MPPT.

[5] ESRAM, Trishan; CHAPMAN, Patrick L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 22, n. 2, p. 439-449, 2007.

[6] VENDRUSCOLO, Miréli Binder. Análise comparativa das técnicas clássicas de MPPT. Brasil, 2020.

[7] BOLLIPO, Raju B. et al. A critical review on solid state transformer-based grid-connected solar PV systems. 2020.

[8] ZADEH, Lotfi Asker. Fuzzy sets. Information and Control, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

Anexos

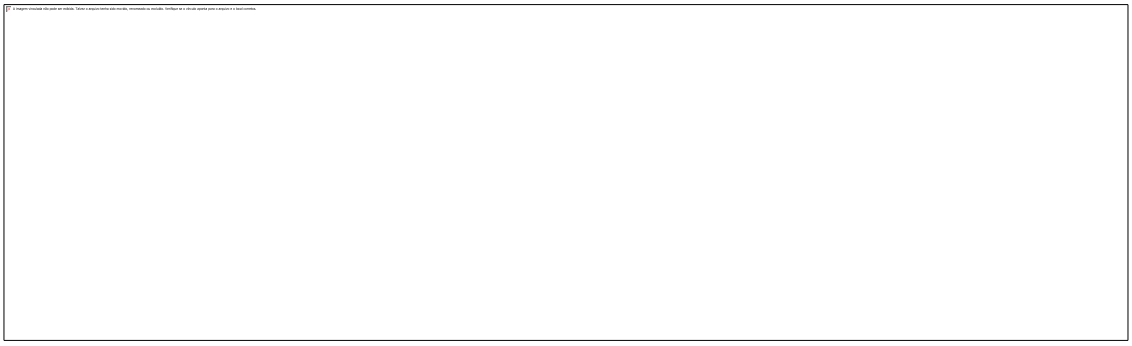


Tabela 1: Valores dimensionados para o protótipo do conversor SEPIC.



Figura 1: Diagrama elétrico do protótipo do conversor SEPIC.

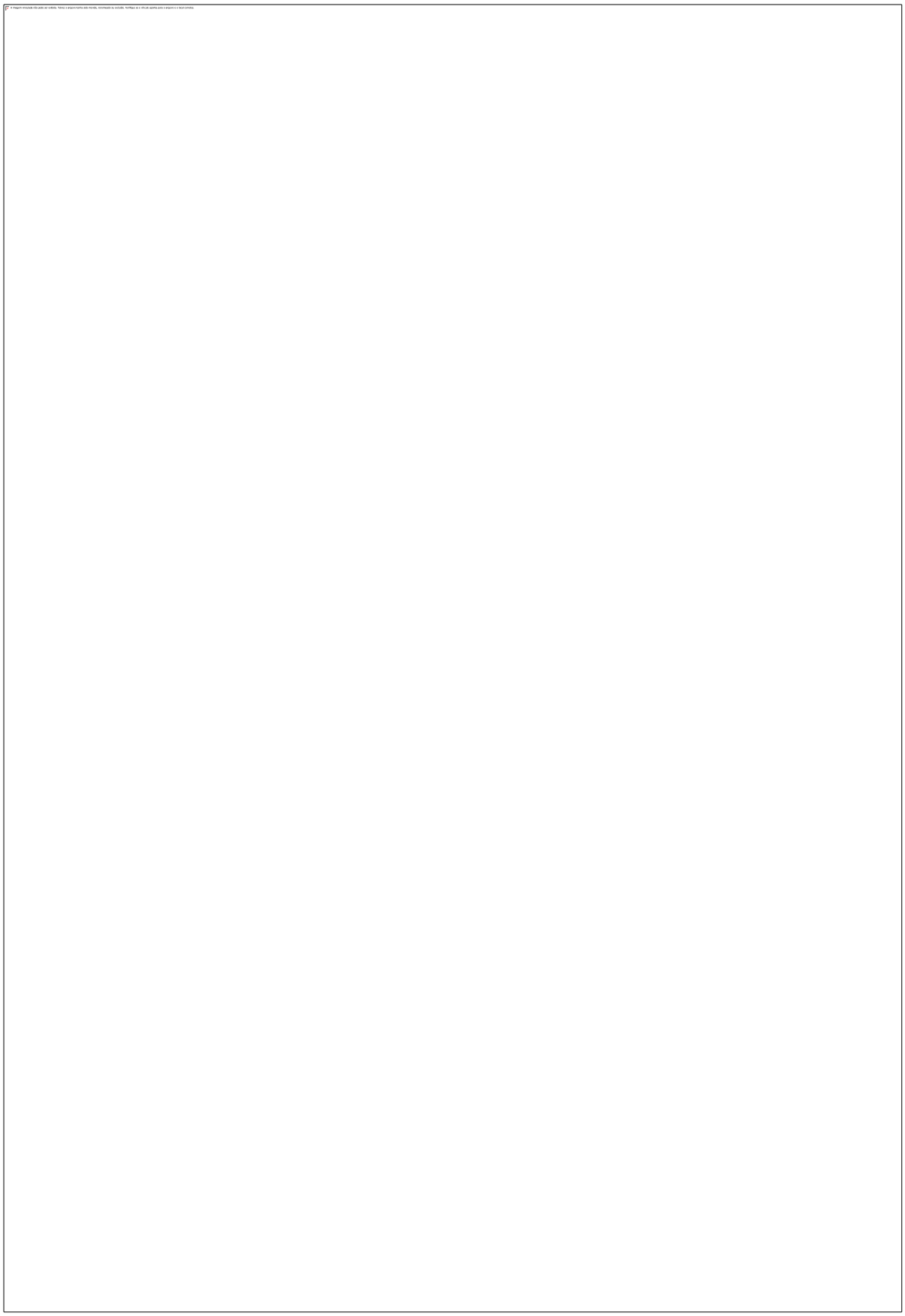


Figura 2: Montagem em bancada experimental do protótipo SEPIC.



Figura 3: Diagrama de blocos do sistema simulado.



Figura 4: Fluxograma do método Perturba e Observa (P&O).



Figura 5: Diagrama de blocos do controlador baseado em lógica fuzzy.

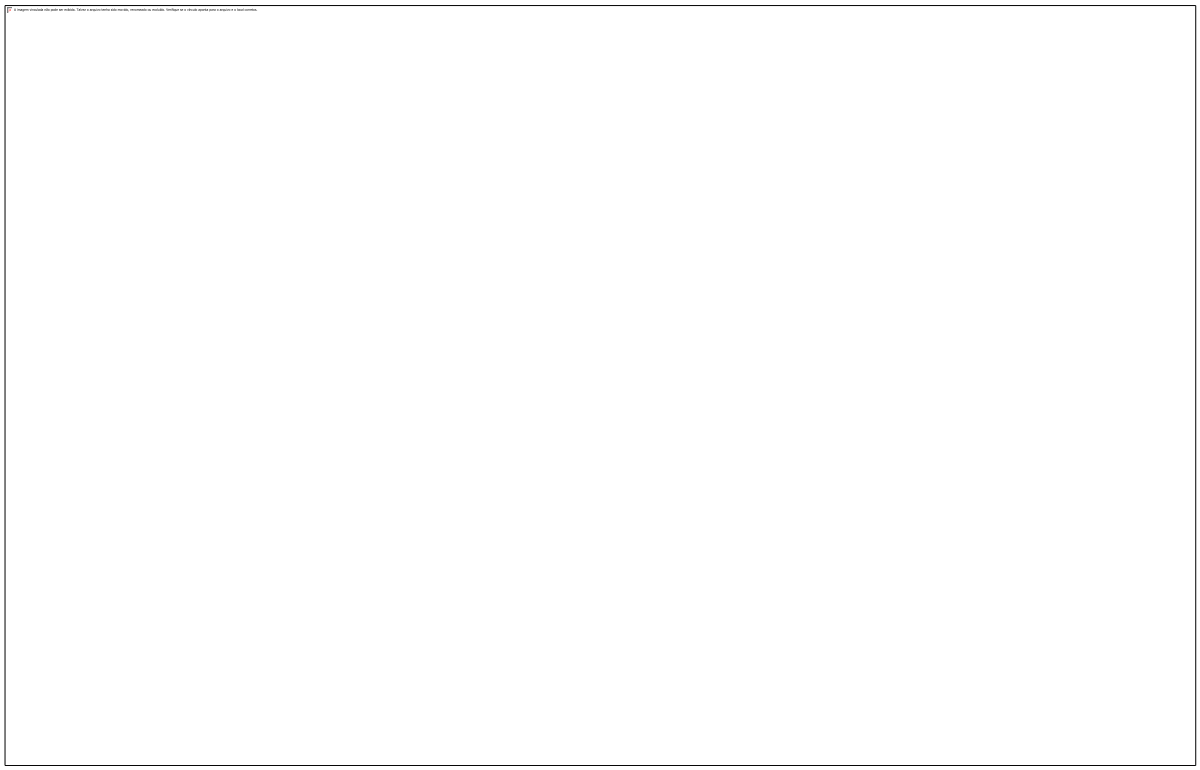


Figura 6: Potência de entrada e saída do conversor SEPIC sob condições ideais (D = 0,573).

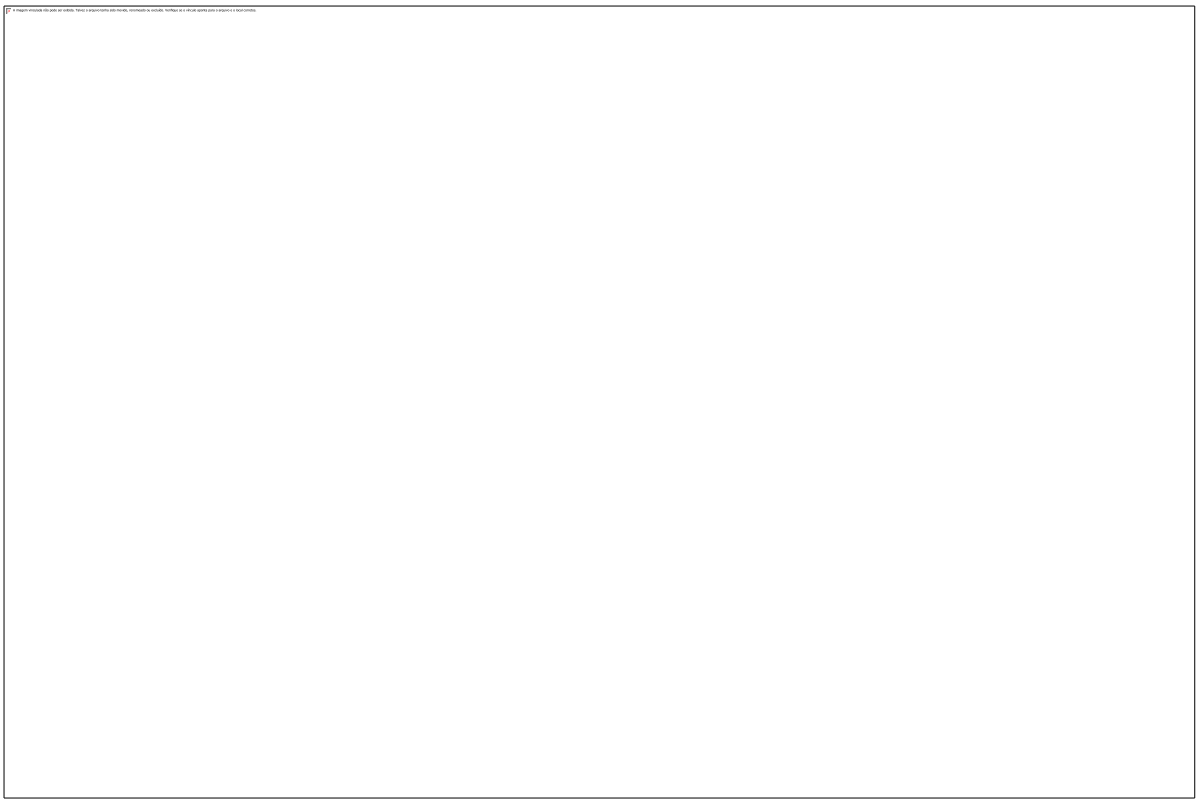
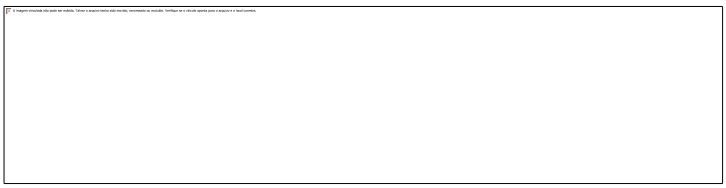


Figura 7: Ganho do conversor SEPIC: comparação entre modelo teórico e resultados experimentais.



Métricas médias de *Ripple* e Erro de Regime Permanente (Ess) no Cenário 1.



Figura 9: Comparação das respostas de potência dos controladores durante o perfil de variação de temperatura (P&O).



Figura 10: Comparação das respostas de potência dos controladores durante o perfil de variação de temperatura (FUZZY).



Tabela 4: Desempenho dinâmico e tempo de acomodação no Cenário 2 (Variação de Irradiância).



Figura 11: Comparação das respostas de potência frente a variações abruptas de irradiância solar (P&O).

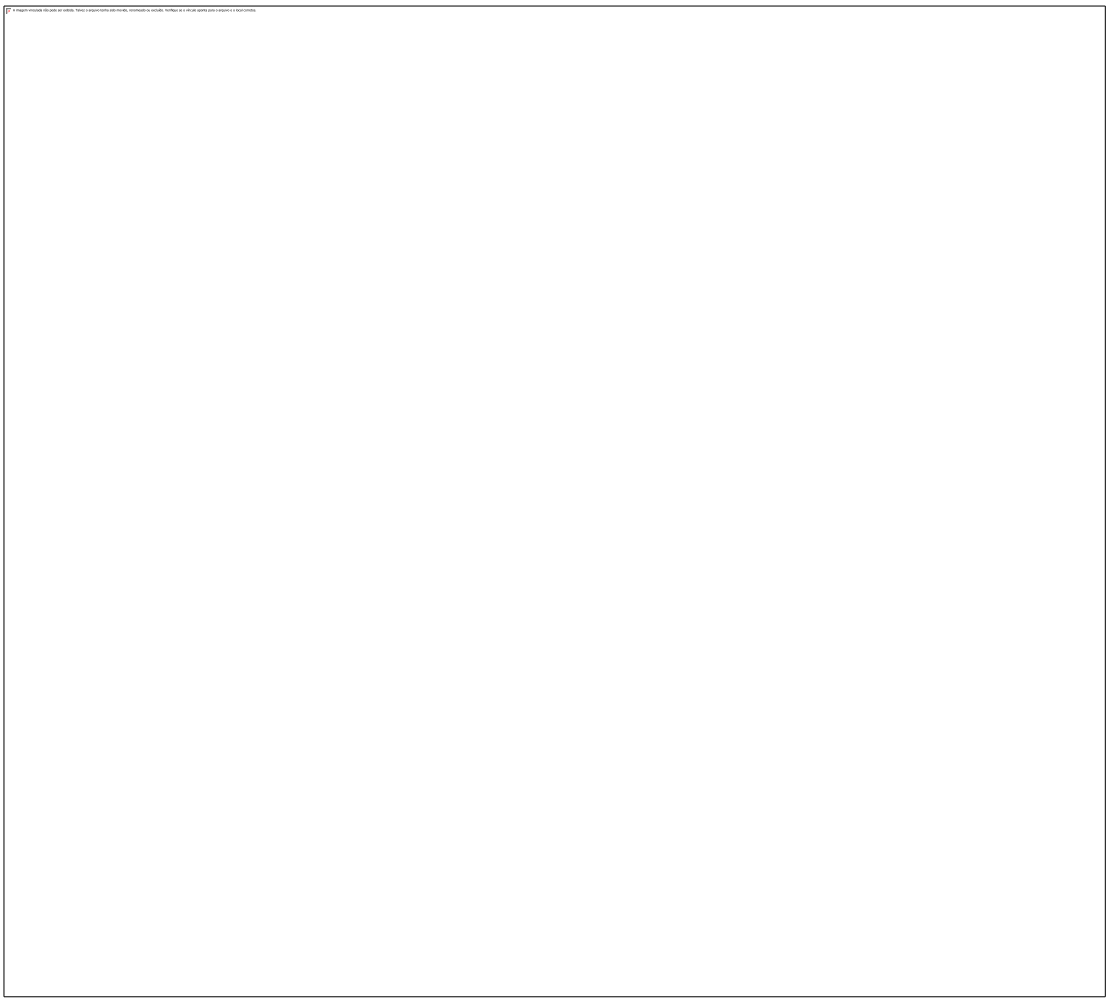


Figura 12: Comparação das respostas de potência frente a variações abruptas de irradiância solar (Fuzzy).

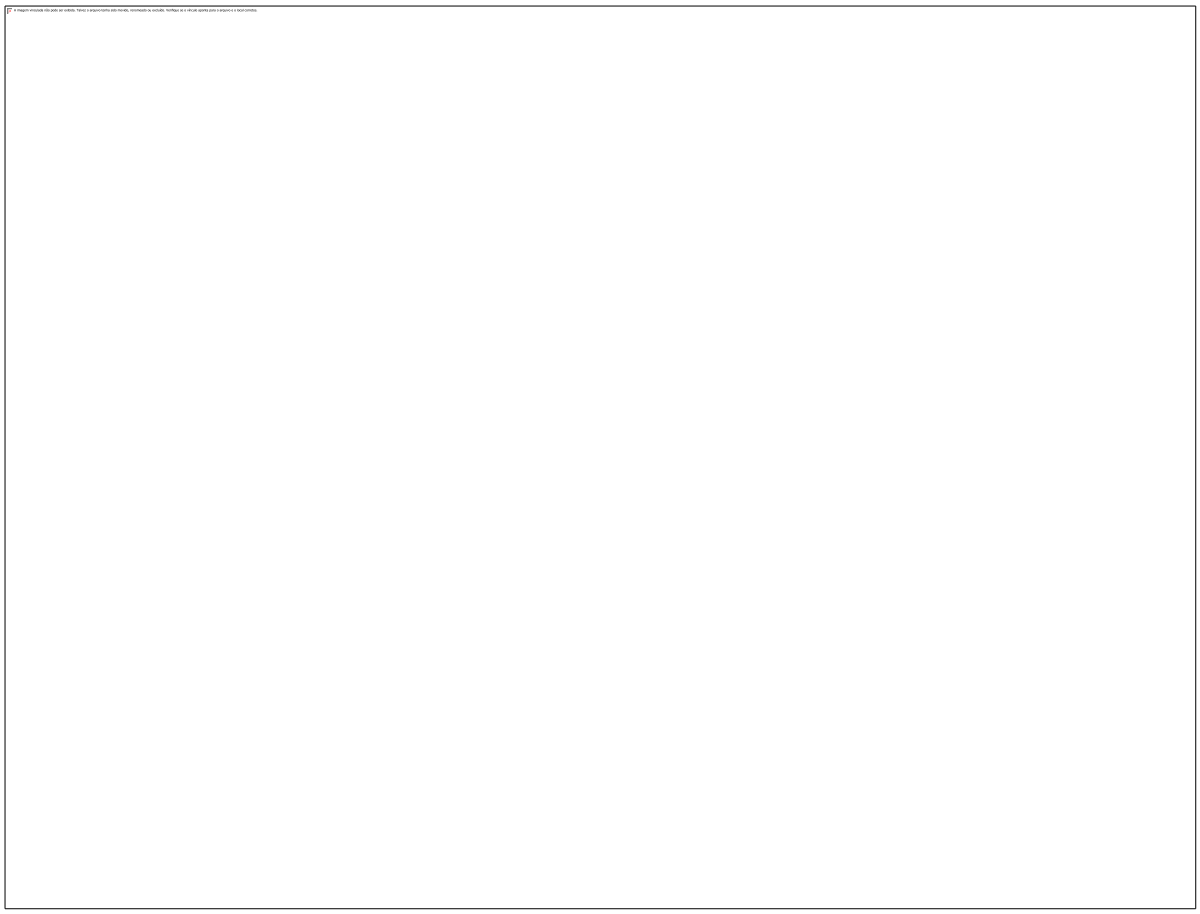


Figura 8: Convergência dos controladores MPPT ao ponto de máxima potência em condição nominal.

CÓDIGO: ET0095

AUTOR: GERLLYSON MARTINIANO DE AMORIM SANTOS

COAUTOR: MARIA CLARA BARBALHO MONTEIRO

ORIENTADOR: JOSE PATROCINIO DA SILVA

TÍTULO: Análise e Modelagem de um Guia de Ondas RIB com Núcleo Anisotrópico e Grafeno para Sensoriamento por Ressonância de Plásmons de Superfície

Resumo

Este relatório final sintetiza os resultados do projeto de Iniciação Científica focado na análise e projeto de sensores e dispositivos plasmônicos em guias de onda tipo RIB com núcleo anisotrópico. Utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM) via código próprio em FORTRAN, foram investigados o acoplamento evanescente entre modos guiados e plasmônicos, o efeito da distância de separação (Δk) e o desempenho da estrutura na detecção de analitos com variação de índice de refração (n_a de 1,3 a 2,0 RIU). A presença da anisotropia no núcleo promoveu o surgimento de modos plasmônicos híbridos e um deslocamento lateral do pico de campo (peak-shift δφ). A deposição de uma camada de grafeno permitiu alcançar forte ressonância plasmônica (SPR) na janela de 1,55 μm, onde o acoplamento mais intenso ocorreu para analitos na faixa de n_a = 1,5 a 1,6, com perdas por confinamento variando entre 1807,98 dB/cm e 2906,51 dB/cm. Os resultados e validações teóricas do projeto culminaram na publicação de dois artigos científicos nos principais congressos nacionais da área: o XLIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2026) e o XXII Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO 2026), consolidando a aplicação do dispositivo em sistemas Lab-on-a-chip e comunicações ópticas.

Palavras-chave: Sensores SPR; Guia anisotrópico; Grafeno; Elementos Finitos; Fotônica

TITLE: Analysis and Modeling of an Anisotropic RIB Waveguide with Graphene for SPR Sensing

Abstract

This final report synthesizes the results of the Scientific Initiation project focused on the analysis and design of plasmonic sensors and devices in RIB-type waveguides with an anisotropic core. Using the Finite Element Method (FEM) implemented in a custom

FORTRAN code, we investigated evanescent mode coupling between guided and plasmonic modes, the impact of separation distance (Δk), and device performance for analyte refractive index sensing (n_a from 1.3 to 2.0 RIU). Core anisotropy led to hybrid plasmonic modes and a field peak-shift (δφ). The addition of a graphene layer enabled strong surface plasmon resonance (SPR) at 1.55 μm, with maximum coupling observed for analytes between n_a = 1.5 and 1.6, yielding confinement losses from 1807.98 dB/cm to 2906.51 dB/cm. The numerical findings and theoretical validations were accepted/published in two full papers presented at major national conferences: SBrT 2026 and SBMO 2026, confirming the structure's high potential for Lab-on-a-chip biosensing and optical communication systems.

Keywords: SPR sensors; Anisotropic waveguide; Graphene; Finite Element Method

Introdução

Dispositivos fotônicos e sensores baseados no fenômeno de Ressonância de Plásmons de Superfície (SPR) representam uma das tecnologias mais promissoras para integração em plataformas Lab-on-a-chip e redes de telecomunicações de alta velocidade. Os plásmons de superfície resultam da oscilação coletiva de elétrons livres na interface metal-dielétrico excitados por ondas eletromagnéticas, permitindo o confinamento da luz em escalas nanométricas. Contudo, desafios como perdas por confinamento, limitações de sensibilidade e casamentos de fase exigem soluções inovadoras em arquitetura de guias de onda. Este trabalho investigou o uso de um guia do tipo RIB constituído por substrato de sílica e núcleo com anisotropia biaxial, combinado com camadas condutoras de ouro ou grafeno. A introdução da anisotropia possibilita alterar as condições de contorno e a constante de propagação, além de induzir o acoplamento de modos híbridos. A pesquisa avaliou tanto a influência do afastamento do elemento plasmônico (Δk) no acoplamento evanescentemente guiado quanto o desempenho da estrutura na função de sensor de índice de refração para analitos diversos.

Metodologia

A modelagem eletromagnética e a análise modal do dispositivo fotônico foram realizadas por meio do Método dos Elementos Finitos (FEM) fundamentado na formulação variacional da equação de onda no domínio da frequência, implementado de forma totalmente customizada em linguagem FORTRAN [6, 10]. A arquitetura investigada compreende um guia de ondas do tipo RIB projetado sobre um substrato dielétrico de sílica fundida (com índice de refração $n_{si} \approx 1{,}45$, largura $W2 = 6{,}0$ μm e altura $H3 = 3{,}5$ μm) e um núcleo retangular com propriedades de anisotropia biaxial (largura $W1 = 2{,}7$ μm e altura $H1 = 1{,}5$ μm) [1, 2]. Posicionou-se uma camada condutora de ouro ou grafeno de espessura nanométrica ($t1 = 35$ nm) sobre a crista do guia [7], logo abaixo de uma região de microcanal reservada para o escoamento ou deposição dos analitos de interesse ($H2 = 1{,}5$ μm) [2]. A resposta óptica do núcleo anisotrópico foi representada computacionalmente por um tensor de permissividade elétrica de ordem 3 com componentes fora da diagonal (ε_{xx}, ε_{yy}, ε_{zz}, ε_{xy}), correlacionando os índices de refração ordinário ($n_o = 1{,}52$) e extraordinário ($n_e = 1{,}48$) para simular a birrefringência do meio [8]. O domínio computacional de

dimensões transversais 15 × 12 μm foi discretizado utilizando uma malha não uniforme composta por aproximadamente 20.000 elementos triangulares de alta ordem [6]. Para mitigar reflexões espúrias nas fronteiras do domínio e simular um meio aberto infinito, aplicou-se o truncamento com camadas perfeitamente casadas do tipo retangular (PML - Perfectly Matched Layers) [6, 10]. A resolução do sistema variacional via aproximação não para-axial de Padé gerou um problema de autovalores generalizado do tipo $[A]\{\Phi\} = n_eff^2 [B]\{\Phi\}$ [6, 10], cuja solução numérica permitiu extrair a parte real e imaginária do índice de refração efetivo complexo (n_eff), além de obter o perfil tridimensional dos campos elétrico e magnético, o deslocamento lateral do pico de intensidade (peak-shift $\delta\varphi$) e as perdas por confinamento (CL) calculadas em dB/cm [1, 2].

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos nas simulações numéricas comprovaram a alta eficiência do dispositivo fotônico tanto para a função de acoplamento de modos quanto para o sensoriamento de analitos via ressonância de plásmons de superfície, culminando na aceitação e publicação de dois artigos completos em congressos nacionais de referência na área [1, 2]. Na primeira etapa da investigação, focada na variação da distância de separação (Δk) entre o núcleo anisotrópico e o filme condutor, constatou-se que a máxima transferência de energia e o maior pico de amplitude do campo elétrico (2,9617 V/m) ocorrem na condição de contato direto ($\Delta k = 0$ μm) [1]. A presença dos tensores de anisotropia no núcleo causou uma quebra de simetria no perfil modal, induzindo um deslocamento transversal do pico de campo ($\delta\varphi$) e promovendo a hibridização entre os modos guiados quase-TE/quasi-TM e os modos plasmônicos de superfície [1, 8]. Observou-se ainda que enquanto o filme de ouro apresentou maior eficiência global de acoplamento, o grafeno demonstrou uma sensibilidade extremamente elevada a pequenas variações no afastamento físico da camada [1, 7]. Na segunda etapa, destinada ao sensoriamento de analitos na janela de telecomunicações de $\lambda = 1{,}55$ μm, variou-se o índice de refração do meio externo (n_a) de 1,3 a 2,0 RIU na estrutura contendo grafeno [2, 3]. Verificou-se que o aumento de n_a elevou a amplitude do campo magnético na interface em até 86%, evidenciando um forte aprisionamento da energia eletromagnética na região de sensoriamento [2]. Em contrapartida, as perdas por confinamento exibiram um crescimento monotônico não linear acentuado, elevando-se de 1807,98 dB/cm para $n_a = 1{,}3$ até atingir o patamar de 2906,51 dB/cm para $n_a = 2{,}0$ [2]. Por fim, as curvas de dispersão modal (n_eff em função de λ) registraram uma queda abrupta na região próxima a 1,55 μm especificamente para analitos com índice de refração na faixa de 1,5 a 1,6 RIU [2], confirmando a ocorrência do casamento de fase e da ressonância de plásmons de superfície (SPR) [3, 5], o que delimita a faixa de operação ótima do sensor para aplicações em Lab-on-a-chip e biosensoriamento [2].

Conclusão

O projeto de Iniciação Científica cumpriu integralmente seus objetivos na modelagem, simulação e análise de sensores e dispositivos plasmônicos em guias de onda do tipo RIB com núcleo anisotrópico. A introdução da anisotropia biaxial no núcleo comprovou ser um mecanismo eficaz para o controle e a manipulação de modos plasmônicos híbridos, gerando um deslocamento lateral do campo que otimiza a transferência de

energia para a interface sensora. A camada de grafeno permitiu alcançar uma forte ressonância plasmônica (SPR) na janela de 1,55 μm, com destaque para a faixa de índice de refração do analito entre n_a = 1,5 e 1,6, onde se observou o acoplamento mais intenso e a maior sensibilidade do dispositivo. A relevância acadêmica e a consistência dos métodos numéricos desenvolvidos em FORTRAN foram consolidadas com a aprovação e publicação de dois artigos completos nos principais congressos nacionais da área: o XLIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2026) e o XXII Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO 2026). Os resultados obtidos abrem perspectivas promissoras para a aplicação desses dispositivos em sistemas Lab-on-a-chip e diagnósticos biomédicos de alta precisão.

Referências

[1] SANTOS, G. M. A.; NETO, S. F. B.; MONTEIRO, M. C. B.; FARIAS, J. V. A.; CUNHA, N. H. O.; SILVA, J. P. da. Análise do Acoplamento de Modos Plasmônicos de Superfície em um Guia de Ondas Anisotrópico. In: XLIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS (SBrT 2026), Salvador, 2026. Salvador: SBrT, 2026. [2] NETO, S. F. B.; SANTOS, G. M. A.; MONTEIRO, M. C. B.; FARIAS, J. V. A.; CUNHA, N. H. O.; SILVA, J. P. da. Análise de um Sensor de Ressonância Plasmônica em Guia de Ondas Anisotrópico com Acoplamento Evanescente. In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICRO-ONDAS E OPTOELETRÔNICA (SBMO 2026), Gravatá, 2026. Gravatá: SBMO, 2026. [3] HOMOLA, J. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species. Chemical Reviews, v. 108, n. 2, p. 462-493, 2008. [4] MAIER, S. A. Plasmonics: fundamentals and applications. New York: Springer Science & Business Media, 2007. [5] NOVOTNY, L.; HECHT, B. Principles of nano-optics. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. [6] JIN, J.-M. The Finite Element Method in Electromagnetics. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. [7] NOVOSELOV, K. S. et al. A roadmap for graphene. Nature, v. 490, n. 7419, p. 192-200, 2012. [8] YEH, P. Optical Waves in Layered Media. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. [9] RÚBIO-MERCEDES, C. E.; CUNHA, N. H. O.; SILVA, J. P. da. Numerical Analysis of Plasmonic Couplers based on Metallic Lens. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, v. 22, p. 346-359, 2023. [10] SILVA, J. P. da. Simulação por elementos finitos da propagação de feixes ópticos em estruturas fotônicas. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

Anexos

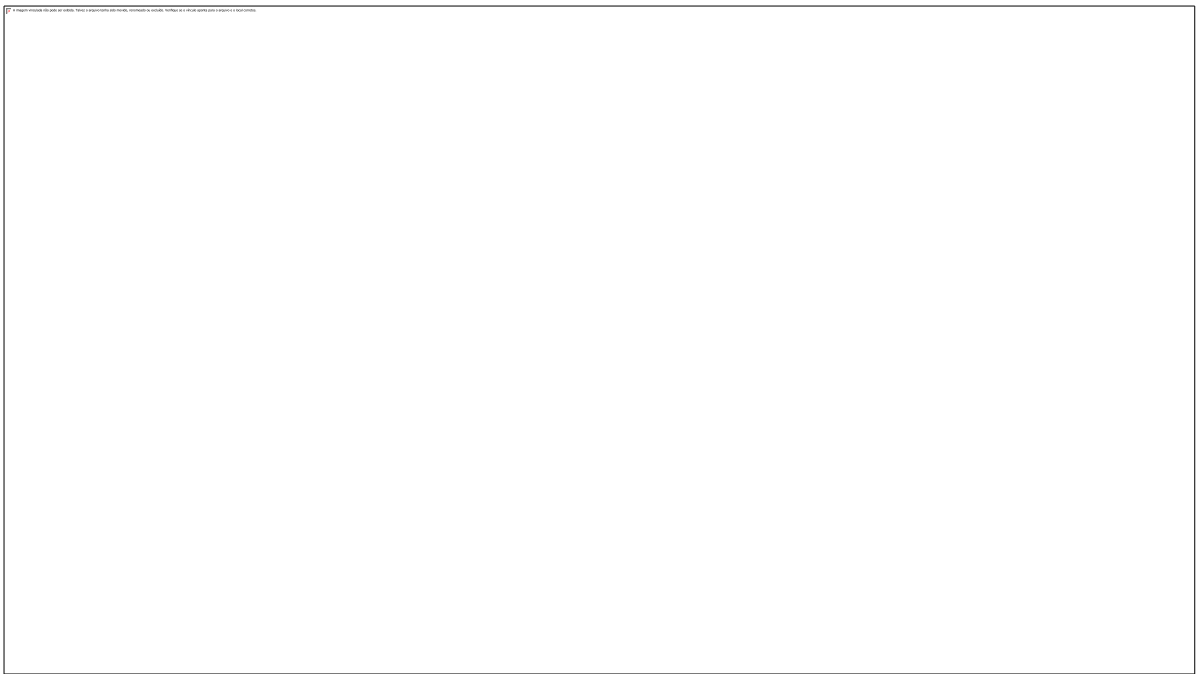


Figura 1 - Esquema da seção transversal do guia de ondas RIB com núcleo anisotrópico, camada condutora nanométrica e microcanal para o analito.



Figura 2 – Distribuição do perfil de campo magnético no guia de ondas para o comprimento de onda de 1,55 µm, evidenciando o acoplamento entre o modo fundamental e o modo plasmônico.

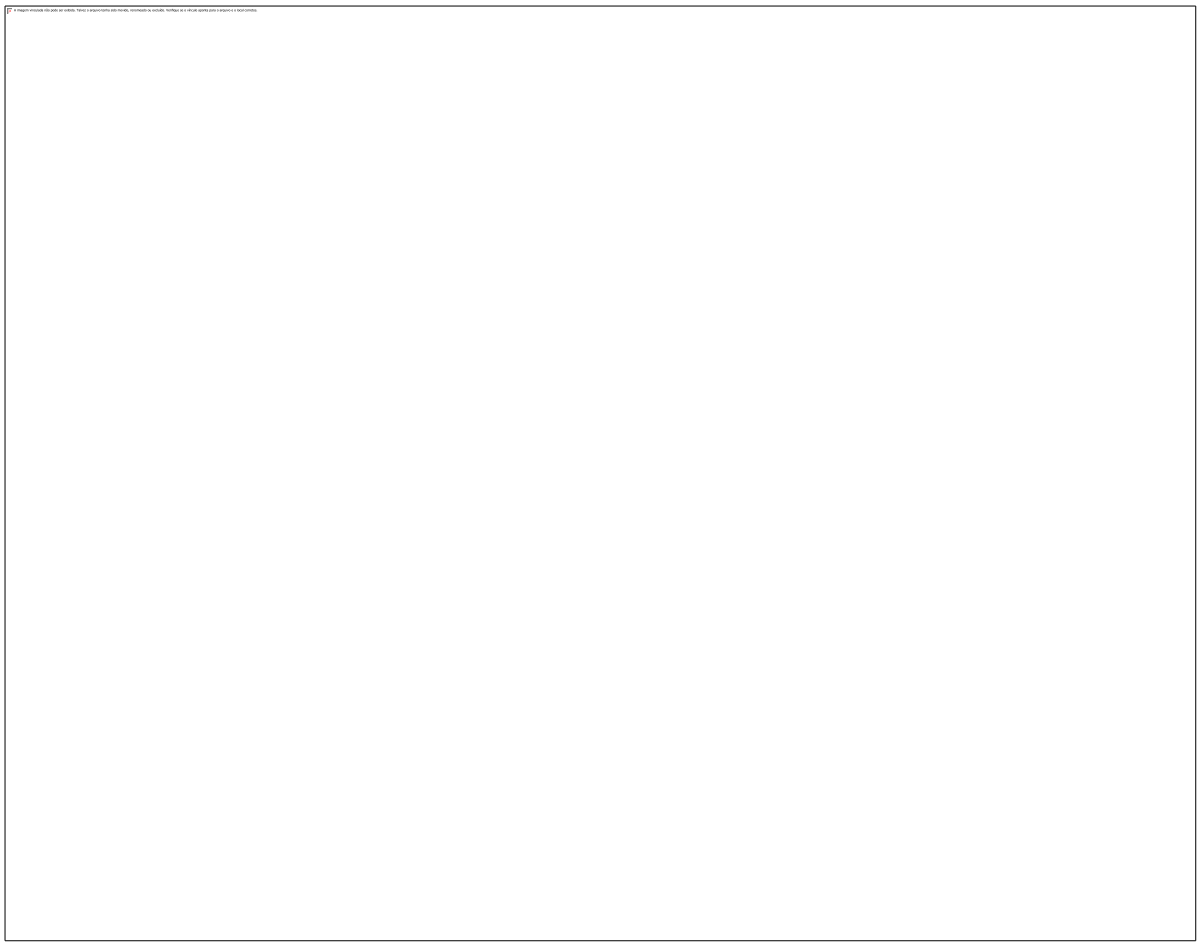


Figura 3 – Perfil do campo magnético ao longo da largura da camada de grafeno para diferentes índices de refração do analito (n_a variando de 1,3 a 2,0 RIU).

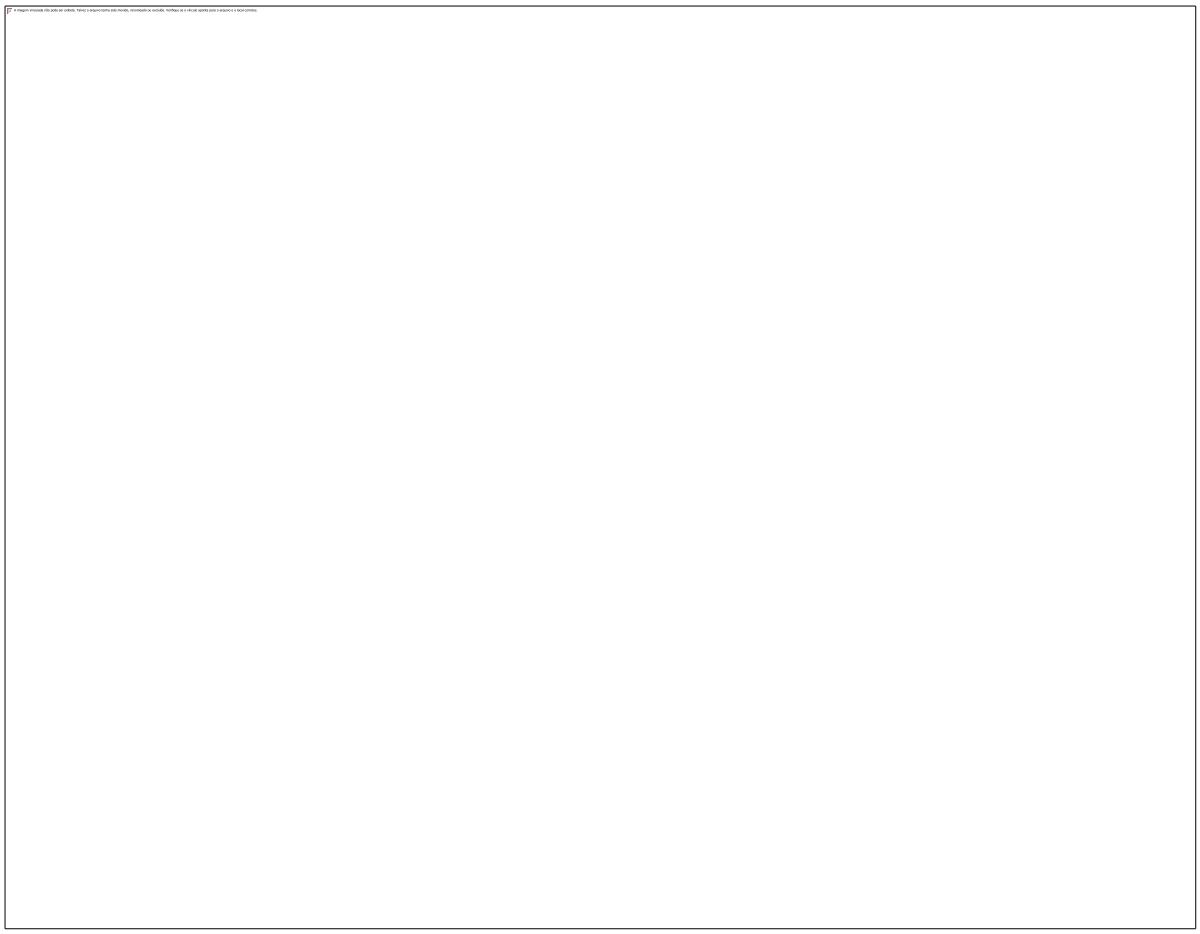


Figura 4 – Comportamento do campo magnético máximo na interface em função da variação do índice de refração do analito (RIU).

CÓDIGO: ET0102

AUTOR: GABRIEL AGOSTINHO DA SILVA

ORIENTADOR: MAURICIO ROBERTO BOMIO DELMONTE

TÍTULO: Estudo das propriedades fotocatalíticas e antimicrobianas da heterojunção AgMnO2/g-C3N4

Resumo

A presença de contaminantes orgânicos persistentes em ambientes aquáticos tem impulsionado o desenvolvimento de materiais fotocatalíticos ativos sob luz visível. Neste relatório, descreve-se a síntese, caracterização e avaliação preliminar de heteroestruturas $AgMnO_2$/g-C_3N_4 contendo 10, 20 e 40% em massa de g-C_3N_4. O $AgMnO_2$ foi obtido pelo método sol-gel autoignição seguido de tratamento térmico, enquanto o g-C_3N_4 foi sintetizado por decomposição térmica da ureia a 550 °C por 3 h. As heteroestruturas foram produzidas por maceração do $AgMnO_2$ com ureia seguida de calcinação. Os materiais foram caracterizados por DRX, MEV/EDS, mapeamento elementar e espectroscopia UV-vis por reflectância difusa. As análises indicaram materiais contendo Ag, Mn e O, com morfologia irregular e agregada, absorção na região visível e energias de band gap entre 1,37 e 1,78 eV. A avaliação fotocatalítica foi realizada utilizando levofloxacino monitorado em 287 nm. Embora o g-C_3N_4 puro tenha apresentado a maior remoção global, a 10A-MCN foi a melhor entre as heteroestruturas, alcançando aproximadamente 70% de remoção total após 60 min de irradiação. Os demais materiais apresentaram desempenho moderado, indicando que a formação das heteroestruturas não resultou, nas condições avaliadas, em melhoria expressiva em relação ao g-C_3N_4 puro. Uma possível explicação está associada à recombinação rápida dos pares elétron-buraco fotogerados, favorecida pelos baixos valores de band gap e por limitações no contato

Palavras-chave: heteroestrutura; fotocatálise; $AgMnO_2$ levofloxacino.

TITLE: Study of the photocatalytic and antimicrobial properties of the AgMnO2/g-C3N4 heterojunction.

Abstract

The presence of persistent organic contaminants in aquatic environments has encouraged the development of visible-light-active photocatalytic materials. This report describes the synthesis, characterization, and preliminary photocatalytic evaluation of $AgMnO_2$/g-C_3N_4 heterostructures containing 10, 20, and 40 wt.% of g-C_3N_4. $AgMnO_2$ was obtained by the sol-gel auto-combustion method followed by thermal treatment, while g-C_3N_4 was synthesized through thermal decomposition of urea at 550 °C for 3 h.

The heterostructures were prepared by maceration of $AgMnO_2$ with urea followed by calcination. The materials were characterized by XRD, SEM/EDS, elemental mapping, and UV-vis diffuse reflectance spectroscopy. The analyses indicated materials containing Ag, Mn, and O, with irregular and aggregated morphology, visible-light absorption, and band gap energies between 1.37 and 1.78 eV. Photocatalytic activity was evaluated using levofloxacin 1 monitored at 287 nm. Although pure g-C_3N_4 showed the highest overall removal, 10A-MCN exhibited the best performance among the heterostructures, reaching approximately 70% total removal after 60 min of irradiation. The remaining samples showed moderate activity, indicating that heterostructure formation did not significantly improve performance over pure g-C_3N_4 under the evaluated conditions. This limitation may be associated with rapid recombination of photogenerated electron-hole pairs, favored by the low band gap values and limited interfacial cont

Keywords: heterostructure; photocatalysis; $AgMnO_2$ levofloxacin.

Introdução

O descarte de contaminantes orgânicos em corpos hídricos representa um problema ambiental relevante, especialmente no caso de fármacos, corantes e compostos fenólicos, que podem persistir no ambiente mesmo em baixas concentrações (1,6). Entre esses contaminantes, antibióticos como o levofloxacino se destacam pela complexidade estrutural, estabilidade química e potencial contribuição para o aumento da resistência antimicrobiana (1). Além disso, efluentes industriais e matrizes complexas, como águas produzidas associadas à exploração de petróleo, podem conter sais, compostos aromáticos e frações oleosas, dificultando a aplicação direta de tratamentos convencionais (5,6). Os processos oxidativos avançados baseados em fotocatálise heterogênea surgem como alternativa promissora, pois permitem a geração de espécies reativas capazes de oxidar moléculas orgânicas utilizando radiação luminosa (1,5,6). A utilização da luz solar como fonte de energia torna a fotocatálise particularmente atrativa para aplicações sustentáveis (5). Entretanto, a eficiência de um fotocatalisador depende de fatores como absorção na região visível, separação eficiente dos pares elétron-buraco, estabilidade estrutural e disponibilidade de sítios ativos na superfície (3,4). O g-C_3N_4 é um semicondutor polimérico amplamente estudado devido à estabilidade química, baixo custo e possibilidade de ativação sob luz visível (2). Apesar disso, sua aplicação pode ser limitada pela recombinação dos portadores de carga (2). Por outro lado, o $AgMnO_2$ é um óxido semicondutor contendo prata e manganês, com estrutura associada à fase monoclínica do tipo crednerita e potencial para aplicações fotocatalíticas (7,8). A combinação $AgMnO_2$/g-C_3N_4 pode favorecer a formação de interfaces semicondutoras e modificar as propriedades ópticas e superficiais do sistema (3,4). Dessa forma, este trabalho teve como objetivo sintetizar, caracterizar e avaliar preliminarmente heteroestruturas $AgMnO_2$/g-C_3N_4 para aplicações ambientais, com foco na remoção de levofloxacino e em ensaios exploratórios com matriz sintética simplificada. Considerando os resultados fotocatalíticos moderados, também se buscou discutir as limitações observadas e propor rotas alternativas para trabalhos futuros

Metodologia

1.1. Síntese dos materiais

O $AgMnO_2$ foi sintetizado por método sol-gel autoignição, seguido de tratamento térmico, visando à obtenção da fase monoclínica do tipo crednerita descrita para esse óxido (7,8). O g-C_3N_4 foi obtido por decomposição térmica da ureia, utilizando temperatura de 550 °C durante 3 h. As heteroestruturas $AgMnO_2$/g-C_3N_4 foram preparadas em diferentes proporções mássicas de g-C_3N_4, correspondentes a 10, 20 e 40%, sendo denominadas 10A-MCN, 20A-MCN e 40A-MCN. O procedimento de obtenção das heteroestruturas envolveu a maceração do $AgMnO_2$ com ureia, seguida de calcinação, buscando promover a formação do g-C_3N_4 em contato com o óxido.

1.2. Caracterização estrutural, morfológica e óptica

A caracterização estrutural foi realizada por difração de raios X (DRX), com varredura na faixa de 10° a 80° em 2θ. A morfologia dos materiais foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), enquanto a composição elementar local foi investigada por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) e mapeamento elementar. As propriedades ópticas foram analisadas por espectroscopia UV-vis por reflectância difusa, sendo as energias de band gap estimadas a partir do método de Tauc.

1.3. Ensaios fotocatalíticos

A atividade fotocatalítica foi avaliada utilizando solução de levofloxacino, monitorada por espectroscopia UV-vis no comprimento de onda de 287 nm. Antes da irradiação, as suspensões foram mantidas no escuro para avaliar a contribuição da adsorção. Em seguida, os sistemas foram irradiados e alíquotas foram analisadas ao longo do tempo por meio da razão C/C_0. Os testes foram conduzidos como etapa de triagem dos materiais, buscando identificar se a formação das heteroestruturas $AgMnO_2$/g-C_3N_4 resultaria em melhoria da remoção do contaminante em relação aos materiais puros.

Também foram realizados ensaios preliminares utilizando uma matriz sintética simplificada contendo fenol, NaCl e fase oleosa, com o objetivo de simular algumas características presentes em águas produzidas. Esses testes foram conduzidos como avaliação inicial de desempenho em meio mais complexo do que soluções aquosas simples.

Resultados e Discussões

1.1. Caracterização estrutural por DRX

Os difratogramas obtidos para o $AgMnO_2$ indicaram a formação de uma fase cristalina associada ao óxido de prata e manganês, com reflexões compatíveis com a estrutura monoclínica do tipo crednerita relatada na literatura (7,8). Para as heteroestruturas, observou-se a preservação das principais reflexões do $AgMnO_2$ após a incorporação do g-C_3N_4, sugerindo que o processo de maceração e calcinação não destruiu a estrutura cristalina predominante do óxido.

Um ponto importante é que algumas reflexões intensas podem estar associadas à presença de prata metálica ou à segregação superficial de espécies contendo Ag, fenômenos que podem ocorrer em materiais à base de $AgMnO_2$ e devem ser considerados na interpretação conjunta do DRX e do EDS (8). Assim, a análise estrutural deve ser tratada como evidência de formação do $AgMnO_2$ e de manutenção da fase principal, mas não como prova isolada de pureza total do material. A identificação do g-C_3N_4 por DRX nas heteroestruturas pode ser dificultada pelo baixo teor relativo, pela menor cristalinidade da fase carbonácea e pela sobreposição de sinais com o $AgMnO_2$ (2,3).

1.2. Morfologia, EDS e mapeamento elementar

As micrografias de MEV selecionadas para as heteroestruturas 10A-MCN, 20A-MCN e 40A-MCN revelaram morfologia irregular, formação de agregados e coexistência de regiões facetadas/lamelares com partículas finas e rugosas. Na 10A-MCN observam-se domínios facetados com partículas aderidas; na 20AMCN a distinção entre a superfície lamelar e os aglomerados particulados é mais evidente; e a 40A-MCN apresenta cobertura mais densa por partículas finas. Essas diferenças morfológicas podem afetar o contato interfacial, a área disponível para adsorção e a ocorrência das reações fotocatalíticas na superfície (3,4).

As análises de EDS identificaram a presença de Ag, Mn e O nas regiões avaliadas, confirmando qualitativamente os elementos esperados para o $AgMnO_2$. Os resultados semiquantitativos mostraram variações locais importantes, com algumas regiões enriquecidas em Ag e outras relativamente mais ricas em Mn, indicando possível heterogeneidade superficial ou segregação local de espécies contendo prata. Os mapas elementares evidenciaram a distribuição de Ag, Mn e O ao longo das áreas analisadas. Como C e N não foram quantificados nos espectros apresentados, o EDS deve ser utilizado principalmente como suporte para a presença do componente $AgMnO_2$, enquanto a confirmação do g-C_3N_4 deve ser discutida em conjunto com as demais caracterizações e com a rota de síntese.

Figura 1. Micrografias de MEV do $AgMnO_2$ puro, do g-C_3N_4 puro e das heteroestruturas 10A-MCN, 20A MCN e 40A-MCN.

3.3. Propriedades ópticas e energia de band gap As análises de UV-vis por reflectância difusa indicaram absorção na região visível para o $AgMnO_2$ e para as heteroestruturas $AgMnO_2$/g-C_3N_4, comportamento compatível com semicondutores de baixo band gap (2,7,8). Os valores de band gap estimados pelos gráficos de Tauc foram próximos para $AgMnO_2$, 10A-MCN e 40A-MCN, enquanto a amostra 20A-MCN apresentou valor mais elevado. A Tabela 1 resume os valores obtidos.

Tabela 1. Energias de band gap estimadas a partir dos gráficos de Tauc.

Amostra Band gap estimado (eV) $AgMnO_2$ 1,38 10A-MCN 1,37 20A-MCN 1,78 40A-MCN 1,38 Tabela 1. Energias de band gap estimadas a partir dos gráficos de Tauc. A semelhança entre os valores do $AgMnO_2$, 10A-MCN e 40A-MCN indica que a resposta óptica é fortemente influenciada pelo óxido. O valor superior observado para 20A-MCN pode estar relacionado à escolha da região linear no método de Tauc, à heterogeneidade da amostra ou a diferenças de dispersão durante a preparação. De modo geral, os baixos

valores de band gap indicam forte absorção na região visível; entretanto, a eficiência fotocatalítica também depende da dinâmica de separação e recombinação das cargas e do potencial redox dos portadores fotogerados (2-4)

Figura 2. Gráficos de Tauc utilizados para estimar as energias de band gap do $AgMnO_2$ e das heteroestruturas $AgMnO_2$/g-C_3N_4.

Avaliação fotocatalítica do levofloxacino A atividade fotocatalítica foi avaliada pela variação da concentração relativa C/C_0 do levofloxacino ao longo do tempo. A etapa de escuro permitiu observar a contribuição da adsorção antes do início da irradiação. Após 60 min de exposição, o g-C_3N_4 puro apresentou a maior remoção global, enquanto a amostra 10A-MCN apresentou o melhor desempenho entre as heteroestruturas $AgMnO_2$/g-C_3N_4. A ordem aproximada de desempenho foi: g-C_3N_4 > 10A-MCN > 40A-MCN > $AgMnO_2$ > 20A-MCN.

Tabela 2. Remoção aproximada de levofloxacino após 60 min de irradiação.

Esses resultados mostram que, nas condições avaliadas, a formação da heteroestrutura $AgMnO_2$/g-C_3N_4 não superou o g-C_3N_4 puro para a remoção de levofloxacino. Portanto, os testes fotocatalíticos podem ser interpretados como resultados moderados e abaixo do desempenho inicialmente esperado para uma heterojunção, cuja função usual é favorecer a separação e a transferência de cargas fotogeradas (3,4). Ainda assim, a amostra 10A-MCN apresentou desempenho superior ao $AgMnO_2$ puro, indicando que a incorporação de pequena fração de g-C_3N_4 pode favorecer parcialmente a remoção do contaminante. Uma hipótese para a limitação observada é a rápida recombinação dos pares elétron-buraco fotogerados, processo reconhecido como uma das principais limitações de fotocatalisadores semicondutores e de heterojunções com contato interfacial insuficiente (2-4). Os valores de band gap estimados para $AgMnO_2$, 10A-MCN e 40A-MCN ficaram próximos de 1,37-1,38 eV, o que indica absorção de luz visível, mas não garante separação eficiente de cargas. Assim, a baixa energia de band gap, associada à heterogeneidade morfológica e ao possível contato interfacial limitado entre $AgMnO_2$ e g-C_3N_4, pode ter contribuído para que os ensaios não apresentassem melhoria expressiva em relação ao g-C_3N_4 puro.

Figura 3. Variação da concentração relativa C/C_0 de levofloxacino durante a etapa de adsorção no escuro e a irradiação para $AgMnO_2$, g-C_3N_4 e heteroestruturas $AgMnO_2$/g-C_3N_4. 3.5.

Ensaios preliminares em matriz sintética simplificada Além da solução de levofloxacino, foram realizados testes preliminares em uma matriz sintética simplificada contendo fenol, NaCl e fase oleosa. Essa matriz foi utilizada como modelo inicial para representar algumas características presentes em águas produzidas, sem a pretensão de reproduzir integralmente a complexidade de uma amostra real. A remoção total observada foi próxima de 51% após 60 min de exposição solar. O resultado deve ser tratado como preliminar, pois sais, matéria orgânica e fases oleosas podem reduzir a transmissão de luz, competir por sítios ativos e consumir espécies oxidantes, dificultando a fotocatálise em matrizes complexas (5,6)

Conclusão

No período avaliado, foram sintetizadas heteroestruturas $AgMnO_2$/g-C_3N_4 contendo 10, 20 e 40% em massa de g-C_3N_4, além dos materiais puros $AgMnO_2$ e g-C_3N_4. As caracterizações indicaram a obtenção de materiais semicondutores com absorção na região visível e band gaps estimados entre 1,37 e 1,78 eV. As análises de MEV revelaram morfologia irregular e agregada, enquanto EDS e mapeamento elementar confirmaram a presença e distribuição de Ag, Mn e O nas regiões analisadas. Nos ensaios fotocatalíticos com levofloxacino, o g-C_3N_4 puro apresentou a maior remoção global, enquanto a 10A-MCN foi a melhor heteroestrutura, alcançando aproximadamente 70% de remoção total após 60 min de irradiação. Apesar disso, as heteroestruturas não apresentaram o ganho de desempenho esperado em relação 6 ao g-C_3N_4 puro, mostrando que a rota $AgMnO_2$/g-C_3N_4, nas condições estudadas, ainda precisa ser otimizada para produzir uma separação de cargas mais eficiente. De modo geral, os resultados obtidos são preliminares e indicam tanto avanços quanto limitações importantes do projeto. A hipótese mais provável para o desempenho fotocatalítico moderado é a recombinação rápida dos pares elétron-buraco, favorecida pelos baixos valores de band gap e possivelmente pelo contato interfacial insuficiente entre as fases. Dessa forma, embora o material não tenha apresentado a eficiência fotocatalítica inicialmente esperada, os dados gerados são relevantes para redirecionar a pesquisa para o acoplamento do $AgMnO_2$ com semicondutores de maior band gap e maior capacidade de separação de cargas.

Referências

[1] KANAKARAJU, D.; GLASS, B. D.; OELGEMÖLLER, M. Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: A review. Journal of Environmental Management, v. 219, p. 189-207, 2018.
[2] ONG, W.-J.; TAN, L.-L.; NG, Y. H.; YONG, S.-T.; CHAI, S.-P. Graphitic carbon nitride (g-C_3N_4)-based photocatalysts for artificial photosynthesis and environmental remediation. Chemical Reviews, v. 116, p. 7159-7329, 2016.
[3] FANG, M.-J.; TSAO, C.-W.; HSU, Y.-J. Semiconductor nanoheterostructures for photoconversion applications. Journal of Physics D: Applied Physics, v. 53, 143001, 2020.
[4] YANG, H. A short review on heterojunction photocatalysts: Carrier transfer behavior and photocatalytic mechanisms. Materials Research Bulletin, v. 142, 111406, 2021.
[5] BORA, L. V.; MEWADA, R. K. Visible/solar light active photocatalysts for organic effluent treatment: fundamentals, mechanisms and parametric review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 76, p. 1393-1421, 2017.
[6] MIKLOS, D. B. et al. Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment: a critical review. Water Research, v. 139, p. 118-131, 2018.
[7] KORICHE, N. et al. Synthesis and physical properties of new oxide $AgMnO_2$. Journal of Materials Science, v. 42, n. 13, p. 4778-4784, 2007.
[8] KATO, S. et al. Synthesis of Delafossite-Type $Ag_{0.9}MnO_2$ by the Precipitation Method at Room Temperature. ACS Omega, v. 4, n. 6, p. 9763-9768, 2019.
[9] ADHIKARI, S. P. et al. One pot synthesis and characterization of Ag-ZnO/g-C_3N_4 photocatalyst with improved photoactivity and antibacterial properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 482, p. 477 484, 2015.

Anexos



Figura 1. Micrografias de MEV do $AgMnO_2$ puro, do g-C_3N_4 puro e das heteroestruturas 10A-MCN, 20A MCN e 40A-MCN.

Tabela 1. Energias de band gap estimadas a partir dos gráficos de Tauc

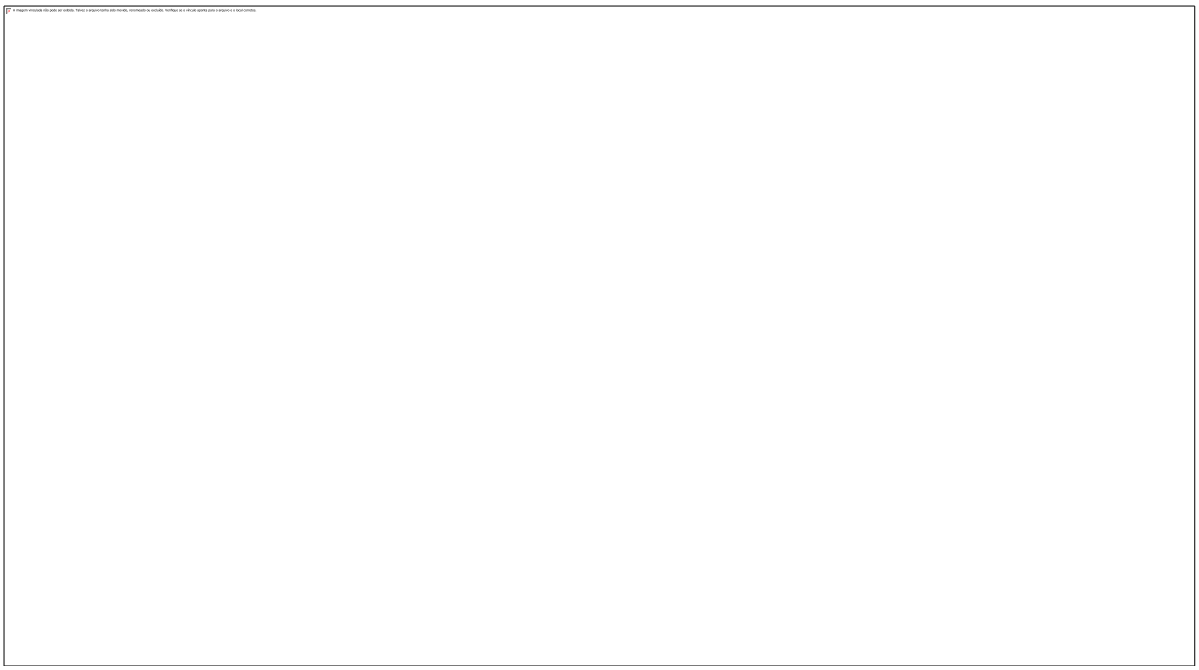


Figura 2. Gráficos de Tauc utilizados para estimar as energias de band gap do $AgMnO_2$ e das heteroestruturas $AgMnO_2$/g-C_3N_4

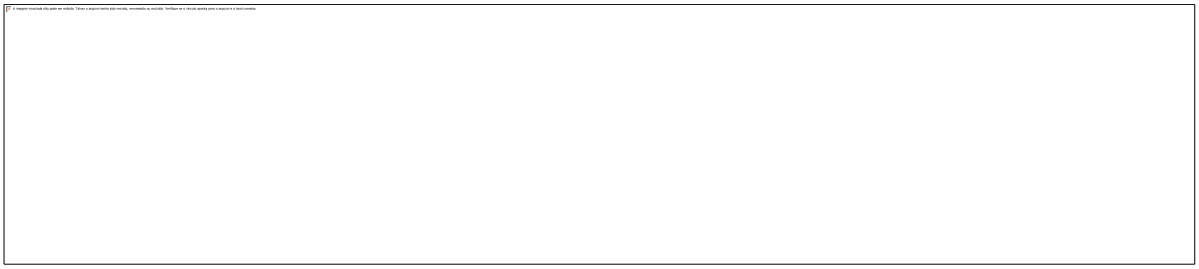


Tabela 2. Remoção aproximada de levofloxacino após 60 min de irradiação.

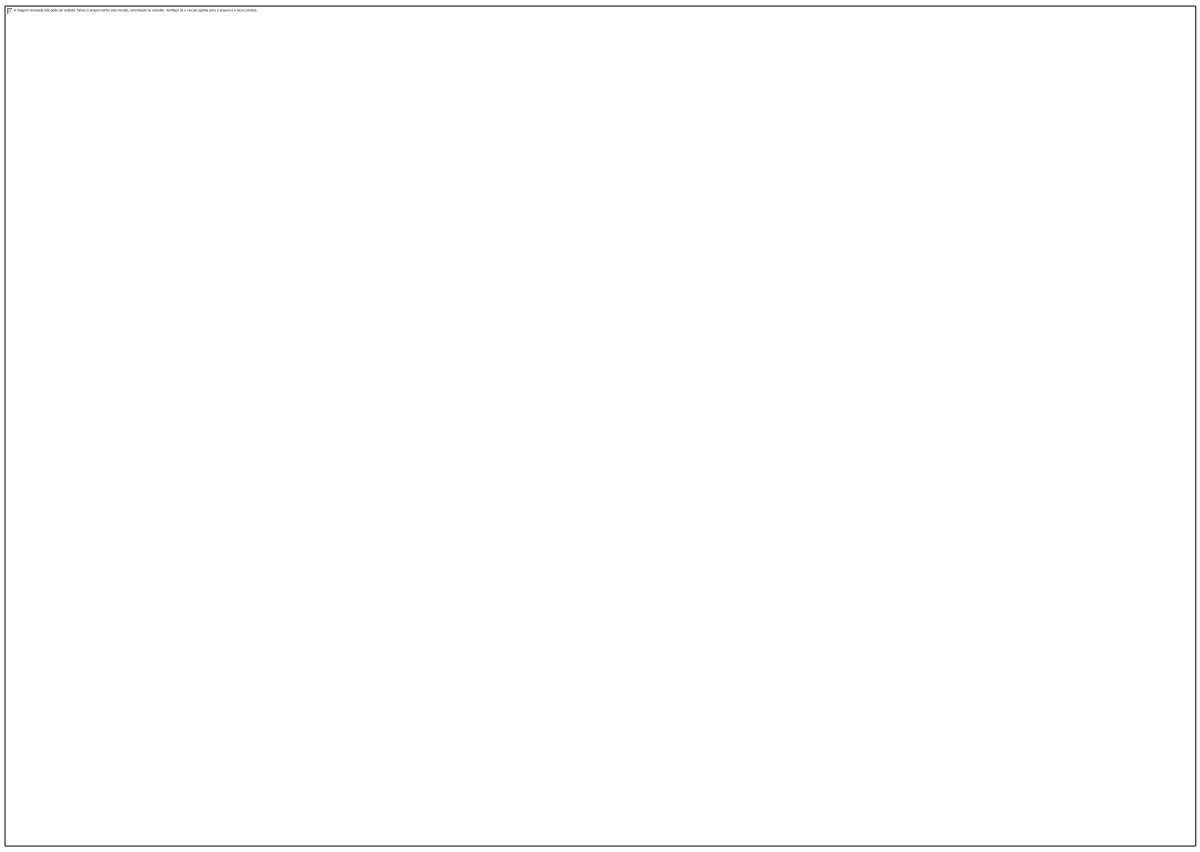


Figura 3. Variação da concentração relativa C/C_0 de levofloxacino durante a etapa de adsorção no escuro e a irradiação para $AgMnO_2$, g-C_3N_4 e heteroestruturas $AgMnO_2$/g-C_3N_4.

CÓDIGO: ET0128

AUTOR: NÍCOLAS ANCHIETA DE BRITO DANIEL

ORIENTADOR: HUMBERTO NEVES MAIA DE OLIVEIRA

TÍTULO: Produção de Green Diesel a partir do Ácido Oleico utilizando Catalisadores de NiMo suportados em Carvão Ativado e Alumina em Processos Supercríticos

Resumo

Este trabalho avaliou a produção de green diesel por desoxigenação catalítica do ácido oleico a 350 °C em condições supercríticas, utilizando catalisadores com 5% de níquel e 15% de molibdênio suportados em alumina e carvão ativado sob pressões de 1,70 e 6,46 bar, em meios anidro e com 5% de água. Todas as condições apresentaram conversão superior a 75%, tendo o hexadecano como principal hidrocarboneto saturado obtido. O sistema com alumina a 6,46 bar em meio anidro obteve o melhor desempenho, atingindo 91,03% de conversão e 74,66% de hidrocarbonetos totais. Já o suporte em carvão ativado destacou-se sob menores pressões e com maior estabilidade na presença de água. Os resultados confirmam o potencial dos catalisadores NiMo e evidenciam que a escolha do suporte e as condições reacionais são determinantes para a eficiência do processo.

Palavras-chave: Green diesel, Desoxigenação catalítica, Ácido oleico, Catalisadores.

TITLE: Production of Green Diesel from Oleic Acid using NiMo Catalysts Supported on Activated Carbon and Alumina in Supercritical Processes

Abstract

This work evaluated the production of green diesel by catalytic deoxygenation of oleic acid at 350 °C under supercritical conditions, using catalysts with 5% nickel and 15% molybdenum supported on alumina and activated carbon under pressures of 1.70 and 6.46 bar, in anhydrous media and with 5% water. All conditions showed conversion greater than 75%, with hexadecane as the main saturated hydrocarbon obtained. The system with alumina at 6.46 bar in anhydrous medium obtained the best performance, reaching 91.03% conversion and 74.66% total hydrocarbons. The activated carbon support stood out under lower pressures and with greater stability in the presence of water. The results confirm the potential of NiMo catalysts and show that the choice of support and reaction conditions are crucial for the efficiency of the process

Keywords: Green diesel, Catalytic deoxygenation, Oleic acid, Catalysts.

Introdução

A constante preocupação global com as mudanças climáticas e a dependência de combustíveis fósseis, largamente responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono, óxidos de enxofre e outros óxidos, têm impulsionado a busca por combustíveis renováveis capazes de substituir, de forma gradual, os derivados de petróleo (CASTRO, 2019; KNOTHE et al., 2010).

O green diesel surge como alternativa promissora ao querosene convencional derivado do petróleo (CASTRO et al., 2019). Diferentemente do biodiesel tradicional (ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos), o green diesel é composto por hidrocarbonetos que apresentam propriedades físico-químicas superiores, como alto número de cetano, alta densidade energética, excelente estabilidade térmica e oxidativa, baixo ponto de congelamento e compatibilidade total com o petrodiesel e a infraestrutura de refino e distribuição existente (Lucantonio et al., 2023). Além disso, sua utilização resulta em redução substancial das emissões de GEE, variando entre 41% e 85% em comparação com o diesel derivado do petróleo (Lucantonio et al., 2023) .

A produção de green diesel a partir de matérias-primas renováveis, como óleos vegetais, ácidos graxos e resíduos oleosos é realizada por meio de processos de desoxigenação (Lucantonio et al., 2023). Estes processos catalíticos promovem a remoção do oxigênio das moléculas na forma de subprodutos como água, monóxido de carbono e dióxido de carbono, por meio de reações como a hidrodesoxigenação (HDO), descarbonilação (DCO) e descarboxilação (DCO2), respectivamente (Gosselink et al., 2013). Assim, HDO resulta em um alcano com o mesmo número de carbonos do ácido graxo precursor, a DCO e a DCO2 produzem hidrocarbonetos com uma cadeia carbônica um átomo de carbono a menos (Pimenta et al., 2021).

Para evitar a competição entre a produção de alimentos e combustíveis, as pesquisas têm se focado na utilização de matérias-primas não comestíveis e resíduos (Gosselink et al., 2013). Dentre as diversas biomassas, como óleo de girassol, óleo de soja, e óleos de cozinha usados, destacam-se os óleos vegetais compostos majoritariamente por triglicerídeos e ácidos graxos de cadeia longa (C16-C18) (Gosselink et al., 2013).

A realização desses processos frequentemente envolve condições hidrotérmicas, caracterizadas por elevadas temperaturas e pressões na presença de água, utilizando catalisadores heterogêneos. Dentre os catalisadores empregados, destacam-se o Níquel-Raney e sistemas à base de metais de transição, como níquel, e molibdênio, suportados em óxidos ou materiais carbonáceos (XIANGZE et al., 2022).

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a produção de combustível renovável a partir do ácido oleico, utilizando catalisadores à base de metais de transição suportados em carvão ativado e alumina, em processos de desoxigenação catalítica. Para isso, foram realizados experimentos variando os catalisadores, suportes e condições reacionais, de modo a compreender a influência desses parâmetros na conversão dos compostos oxigenados e na formação de hidrocarbonetos. A análise dos produtos obtidos foi realizada por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas, permitindo avaliar tanto a distribuição dos hidrocarbonetos formados quanto a conversão das matérias-primas empregadas.

Metodologia

Os experimentos e análises foram realizados no Laboratório de Tecnologia Supercrítica e Biodiesel e no NUPEG, ambos fazem parte do Núcleo de Tecnologia da UFRN. A matéria prima selecionada para o processo foi o ácido oleico (AO) grau PA da marca ACS, devido ser amplamente utilizado como composto modelo para os estudos de desoxigenação (Gosselink et al., 2013).

A metodologia utilizada para a preparação dos catalisadores foi adaptada de (Pimenta et al., 2021). Onde os suportes utilizados foram o carvão ativado comercial em pó, da marca Neon e alumina comercial, que foram impregnados com soluções aquosas de nitrato de níquel (Ni(NO3)2·6H2O) e heptamolibdato de amônio ((NH4)6Mo7O24·4H2O), todos PA e da marca Neon. Foi selecionado um volume dos sais para o preparo das concentrações desejadas nos catalisadores (Ni 5% e Mo 15%). A preparação dos catalisadores foi realizada por meio do método de co-impregnação por umidade e calcinados em uma temperatura de 500°C por volta de 5 horas. As amostras após calcinadas foram encaminhadas para a caracterização. A utilização de sistemas contendo Ni e Mo em processos de conversão e desoxigenação de compostos derivados de biomassa é reportada na literatura, incluindo sistemas suportados em materiais carbonáceos (MUKUNDAN et al., 2019).

A metodologia de reação de descarboxilação foi adaptada de (MUKUNDAN et al., 2019). O aparato experimental utilizado na reação é composto de um reator de batelada 4848 da marca Parr, um controlador do reator para temperatura e agitação, linhas de gases de e um kitassato na linha de saída do reator conforme a Figura 1.

As reações foram conduzidas a 350 °C, durante 300 min sob agitação constante de 600 rpm. Para os ensaios, foram utilizados 100 mL de ácido oleico e aproximadamente 4,46 g de catalisador. Foram avaliados os catalisadores $NiMo/Al_2O_3$ e NiMo/AC sob atmosfera de nitrogênio (N_2), considerando duas pressões iniciais: 1,70 e 6,46 bar.

Para avaliar a influência da presença de água sobre o desempenho dos catalisadores, foram realizadas reações em condições anidras e com adição de 5% de água. Dessa forma, foram avaliadas oito condições experimentais, resultantes da combinação dos dois catalisadores, das duas pressões iniciais e das duas condições de presença de água com pode se observar na Tabela A.

O experimento avalia individualmente e de forma combinada a influência do suporte catalítico, da pressão inicial e da presença de água sobre a conversão do ácido oleico e sobre a distribuição dos produtos formados. A natureza do catalisador e as condições reacionais são fatores relevantes para o direcionamento das rotas de desoxigenação e para a formação de hidrocarbonetos (GOSSELINK et al., 2013).

Após a reação, as amostras recolhidas foram caracterizadas em um GCMS-QP2010 Ultra, da marca Shimadzu Corporation, equipado com uma coluna capilar DB-5 (30 m x 0,25 mm x 0,10 μm). Foi utilizado como solvente o diclorometano PA para determinação da

conversão e distribuição de hidrocarbonetos similar a metodologia utilizada por (SHI et al., 2018). Os produtos identificados foram agrupados em hidrocarbonetos saturados, hidrocarbonetos insaturados, compostos oxigenados, derivados de ácidos graxos e ácido oleico residual.

A conversão do ácido oleico foi determinada a partir da diferença entre sua concentração inicial de ácido oleico e sua concentração final de ácido oleico após a reação, conforme a Equação (1) conforme (KROBKRONG et al., 2018; KAEWMEESRI et al., 2015) :

$$Conv\ (\%) = (([AO]o - [AO]f)/ [AO]o) \times 100 \quad (1)$$

onde:

Conv (%) = conversão do ácido oleico

[AO]o = concentração inicial de ácido oleico

[AO]f = concentração final de ácido oleico

O rendimento dos hidrocarbonetos saturados e insaturados foi calculado considerando a concentração final de cada grupo de produtos em relação à concentração inicial de ácido oleico, conforme a Equação (2) conforme (KROBKRONG et al., 2018; KAEWMEESRI et al., 2015; LIU et al., 2020):

$$Y\ (\%) = ([P]f / [AO]o) \times 100 \quad (2)$$

onde:

Y (%) = rendimento dos hidrocarbonetos

[P]f = concentração final (wt%) de hidrocarbonetos

[AO]o = concentração inicial de ácido oleico

A seletividade para hidrocarbonetos saturados e insaturados foi calculada considerando a quantidade de ácido oleico consumida durante a reação, conforme a Equação (3) de acordo com (VERIANSYAH et al., 2012):

$$Sc\ (\%) = ([P]f /([AO]o-[AO]f)) \times 100 \quad (3)$$

onde:

Sc (%) = seletividade para hidrocarbonetos

[P]f = concentração final (wt%) de hidrocarbonetos

[AO]o = concentração inicial de ácido oleico

[AO]f = concentração final de ácido oleico

Além dos ensaios principais, foi considerado um experimento complementar utilizando o catalisador NiMo/AC, com o objetivo de avaliar a composição dos principais hidrocarbonetos saturados formados durante um processo de desoxigenação sequencial. Inicialmente, o reator foi carregado com 80 mL de ácido oleico e 3,56 g de catalisador NiMo/AC. Para a remoção do ar residual, o sistema foi purgado com nitrogênio durante 3 min. Após o fechamento das válvulas de descarga, o reator foi pressurizado com N_2 até uma pressão inicial de 1,70 bar. A primeira etapa foi conduzida a 350 °C, sob agitação de 600 rpm, durante 300 min. Ao final desse período, o sistema foi resfriado até aproximadamente 24 °C e foi coletada uma amostra da fase líquida. Na segunda etapa, o reator foi novamente selado e purgado com hidrogênio durante 3 min. Em seguida, o sistema foi pressurizado com H_2 até uma pressão inicial de 7,90 bar. A reação foi então conduzida a 350 °C, sob agitação de 600 rpm, durante 225 min. Após o término da segunda etapa, o sistema foi resfriado até aproximadamente 24 °C e uma amostra da fase líquida foi coletada para análise por GC-MS. Os compostos identificados nessa análise foram utilizados para caracterizar a composição da fração de hidrocarbonetos saturados. Os principais componentes identificados foram apresentados individualmente.

Resultados e Discussões

Nesta seção do Relatório estão presentes os resultados obtidos dos experimentos, com suas discussões. Os resultados obtidos permitiram avaliar a influência do suporte catalítico, da pressão inicial e da presença de água sobre a conversão do ácido oleico e a distribuição dos produtos formados. Foram avaliados os catalisadores NiMo suportados em Al_2O_3 e carvão ativado (AC), em condições anidras e com adição de 5% de água. Além da conversão do ácido oleico, foram analisados os rendimentos e as seletividades para hidrocarbonetos saturados e insaturados, bem como a distribuição global dos produtos de reação.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos após 300 min de reação para os catalisadores NiMo/Al_2O_3 e NiMo/AC, considerando as pressões iniciais de 1,70 e 6,46 bar e a presença ou ausência de 5% de água.

De maneira geral, as condições avaliadas apresentaram conversões superiores a 75%, indicando que ambos os catalisadores foram capazes de promover o consumo significativo do ácido oleico. Entretanto, a conversão do reagente não apresentou relação direta com a formação dos produtos de interesse, uma vez que a distribuição dos produtos variou consideravelmente de acordo com o suporte e com a presença de água.

Na pressão de 1,70 bar e na ausência de água, os catalisadores NiMo/Al_2O_3 e NiMo/AC apresentaram conversões de 82,05% e 82,67%, respectivamente. Apesar da conversão semelhante, o NiMo/AC apresentou maior rendimento de hidrocarbonetos saturados, correspondente a 21,05%, enquanto o NiMo/Al_2O_3 apresentou rendimento de 13,16%. As seletividades para hidrocarbonetos saturados foram de 25,47% para NiMo/AC e 16,04% para NiMo/Al_2O_3. esses resultados indicam que o suporte influencia não apenas o consumo de ácido oleico, mas também a distribuição dos produtos obtidos

A adição de 5% de água à reação realizada a 1,70 bar provocou redução da conversão para ambos os catalisadores. Para o NiMo/Al_2O_3, a conversão diminuiu de 82,05% para 75,24%, enquanto para o NiMo/AC houve redução de 82,67% para 76,39%. O efeito também foi observado no rendimento dos hidrocarbonetos saturados, que diminuiu de 13,16% para 9,73% sobre NiMo/Al_2O_3 e de 21,05% para apenas 3,54% sobre NiMo/AC.

O efeito da água foi particularmente pronunciado sobre o NiMo/AC, para o qual a seletividade para hidrocarbonetos saturados diminuiu de 25,47% para 4,64%. Dessa forma, nas condições de menor pressão, a presença de água parece desfavorecer a formação de hidrocarbonetos saturados, principalmente quando o carvão ativado é utilizado como suporte.

O aumento da pressão inicial para 6,46 bar apresentou efeito diferente de acordo com o suporte utilizado . Na ausência de água, o NiMo/Al_2O_3 apresentou aumento da conversão de 82,05% para 91,03%. Além disso, o rendimento de hidrocarbonetos saturados aumentou de 13,16% para 30,90%, acompanhado de aumento da seletividade de 16,04% para 33,95%. Esse comportamento indica que a maior pressão favoreceu tanto o consumo do ácido oleico quanto a formação de hidrocarbonetos saturados sobre o catalisador suportado em alumina.

Para o NiMo/AC, por outro lado, o aumento da pressão de 1,70 para 6,46 bar provocou apenas pequena alteração na conversão, que passou de 82,67% para 83,35%. Entretanto, o rendimento de hidrocarbonetos saturados aumentou de 21,05% para 24,99%, enquanto a seletividade aumentou de 25,47% para 29,99%. Assim, embora a pressão tenha apresentado menor influência sobre a conversão nesse catalisador, observou-se uma alteração favorável na formação de hidrocarbonetos saturados.

Quando 5% de água foram adicionados à condição de 6,46 bar, a conversão sobre NiMo/Al_2O_3 diminuiu para 78,60%, enquanto sobre NiMo/AC foi obtida conversão de 86,73%. Para o NiMo/Al_2O_3, a presença de água também provocou redução do rendimento de hidrocarbonetos saturados, de 30,90% para 4,42%. Já para o NiMo/AC, o rendimento foi reduzido de 24,99% para 18,98%.

De modo geral, os resultados demonstram que o efeito da água não é independente do suporte catalítico. O NiMo/Al_2O_3 apresentou elevada sensibilidade à presença de água, especialmente na maior pressão, enquanto o NiMo/AC apresentou alterações menos acentuadas na distribuição de hidrocarbonetos. Portanto, a escolha do suporte mostrou-se relevante para o direcionamento da reação e para a obtenção dos produtos desejados.

A distribuição dos produtos obtidos nas diferentes condições experimentais é apresentada nos gráficos 1 e 2. Os produtos foram classificados em hidrocarbonetos saturados, hidrocarbonetos insaturados, compostos oxigenados, derivados de ácidos graxos e ácido oleico residual.

Na condição de 1,70 bar, apresentada no gráfico 1, os hidrocarbonetos insaturados constituíram os principais produtos para todas as condições avaliadas. Na ausência de água, foram obtidas concentrações de 34,27% e 42,80% para NiMo/Al_2O_3 e NiMo/AC, respectivamente. A maior quantidade de hidrocarbonetos insaturados foi observada para o NiMo/AC em condição anidra.

Os hidrocarbonetos saturados apresentaram comportamento semelhante, sendo observada maior formação para o NiMo/AC anidro, com 18,00%, em comparação a 11,25% para o NiMo/Al_2O_3. Dessa forma, a soma das frações de hidrocarbonetos saturados e insaturados correspondeu a 60,80% para NiMo/AC anidro, enquanto para NiMo/Al_2O_3 anidro essa fração correspondeu a 45,52%.

A presença de água causou uma redução da fração de hidrocarbonetos saturados e insaturados. No caso do NiMo/AC, a quantidade de hidrocarbonetos saturados diminuiu de 18,00% para 3,01% após a adição de água, enquanto os hidrocarbonetos insaturados passaram de 42,80% para 38,17%. Para o NiMo/Al_2O_3, os hidrocarbonetos saturados diminuíram de 11,25% para 8,32%, enquanto os insaturados passaram de 34,27% para 32,42%.

Outro parâmetro que é observado no gráfico 1 foi o aumento de uma fração de derivados de ácidos graxos com a adição da água. Para o NiMo/Al_2O_3, essa parâmetro passou de 24,30% para 34,43%, enquanto para o NiMo/AC aumentou de 19,83% para 30,14%. Ao mesmo tempo que a quantidade de ácido oleico residual aumentou de 15,35% para 21,17% para NiMo/Al_2O_3 e de 14,82% para 20,19% para NiMo/AC. Esses resultados estão de acordo com a redução da conversão observada anteriormente e indicam que a presença de água modificou o direcionamento da reação.

Na condição de maior pressão, apresentada no gráfico 2, observou-se uma diferença entre os sistemas catalíticos. O NiMo/Al_2O_3 anidro apresentou 26,42% de hidrocarbonetos saturados e 48,24% de hidrocarbonetos insaturados, totalizando 74,66% de hidrocarbonetos. Esse resultado mostra o efeito favorável da combinação de uma pressão mais alta e ausência de água para a formação de hidrocarbonetos sobre esse catalisador.

Contudo, a adição de 5% de água ao NiMo/Al_2O_3 provocou redução da fração total de hidrocarbonetos para 12,34%, sendo 3,78% de saturados e 8,56% de insaturados. Simultaneamente, a fração de compostos oxigenados aumentou de 4,27% para 49,59%. Dessa forma, a água provocou uma alteração na distribuição dos produtos para o sistema NiMo/Al_2O_3 em 6,46 bar.

Na ausência de água, para o NiMo/AC foram obtidos 21,37% de hidrocarbonetos saturados e 30,68% de insaturados, correspondendo a uma fração total de hidrocarbonetos de 52,05%. Com a adição de água, os valores passaram para 16,23% e 33,16%, respectivamente, totalizando 49,39% de hidrocarbonetos. Dessa forma, diferentemente do observado para NiMo/Al_2O_3, a presença de água provocou apenas pequena alteração na quantidade total de hidrocarbonetos obtidos sobre NiMo/AC.

Os resultados apresentados nos gráficos 1 e 2 indicam que a influência da pressão e da água depende do suporte empregado. O aumento da pressão foi particularmente favorável à formação de hidrocarbonetos sobre NiMo/Al_2O_3 na condição anidra, enquanto o NiMo/AC apresentou menor sensibilidade à adição de água. Esses resultados demonstram que a conversão do ácido oleico, isoladamente, não é suficiente para determinar a melhor condição reacional, sendo necessário considerar também a distribuição e o rendimento dos produtos formados.

A formação de hidrocarbonetos saturados é o principal alvo devido ao potencial desses compostos como componentes de combustíveis renováveis. A análise dos resultados

mostrou que tanto o suporte quanto às condições reacionais influenciaram na formação dessa classe de produtos.

Na pressão de 1,70 bar, o maior rendimento de hidrocarbonetos saturados foi obtido utilizando NiMo/AC em condição anidra, com 21,05%. Porém, na pressão de 6,46 bar, o maior rendimento foi obtido com NiMo/Al_2O_3 anidro, alcançando 30,90%. Esse resultado demonstra que a alteração da pressão pode modificar a resposta do catalisador de acordo com o suporte utilizado.

A distribuição de produtos também mostrou que os hidrocarbonetos saturados não correspondem a uma única espécie química, mas a uma mistura de compostos com diferentes tamanhos de cadeia. A Tabela 2 apresenta a composição dos principais hidrocarbonetos saturados obtidos em reações sequenciais realizadas utilizando NiMo/AC a 350 °C, inicialmente sob atmosfera de N_2 a 1,70 bar e posteriormente sob H_2 a 15,70 bar, com rendimento da fração saturada de 51,1%.

O principal composto identificado foi o hexadecano ($C_{16}H_{34}$), correspondente a 23,39 wt% da composição apresentada. Em seguida, destacaram-se o dodecano ($C_{12}H_{26}$), com 7,78 wt%, e o n-nonilciclohexano ($C_{15}H_{30}$), com 5,04 wt%. Também foram identificados undecano (2,19 wt%), decano (2,25 wt%) e nonano (2,99 wt%).

A predominância do hexadecano demonstra a formação de hidrocarbonetos saturados de cadeia longa a partir da transformação do ácido oleico. A presença simultânea de compostos lineares com diferentes números de carbonos e de um hidrocarboneto cíclico evidencia uma distribuição diversificada de produtos. Entretanto, a identificação desses compostos, isoladamente, não permite determinar a rota reacional específica pela formação de cada composto, sendo necessária a análise conjunta das possíveis reações de desoxigenação, hidrogenação, craqueamento, ciclização e rearranjo.

Os valores de 23,39%, 7,78%, 5,04% e demais componentes correspondem à participação dos compostos identificados na composição apresentada, enquanto o valor de 51,1% representa o rendimento da fração de hidrocarbonetos saturados obtida na condição experimental descrita.

A análise dos resultados mostra que a maior conversão de ácido oleico não é responsável pela maior formação de hidrocarbonetos. Esse comportamento pode ser observado, por exemplo, para o NiMo/Al_2O_3 a 6,46 bar e sem água, que apresentou a maior conversão, de 91,03%, além de 30,90% de rendimento em hidrocarbonetos saturados. Na mesma condição, a fração total de hidrocarbonetos alcançou 74,66%, demonstrando que uma parcela do ácido oleico convertido foi direcionada para produtos hidrocarbonetos.

Porém, a presença de água alterou significativamente a distribuição dos produtos, especialmente sobre NiMo/Al_2O_3. A redução da fração de hidrocarbonetos acompanhada pelo aumento da fração de compostos oxigenados e derivados de ácidos graxos indica que a água altera o comportamento do sistema catalítico. Dessa forma, a avaliação da eficiência do processo deve considerar ao mesmo tempo a conversão do ácido oleico, o rendimento dos hidrocarbonetos e a distribuição dos produtos.

O NiMo/AC apresentou comportamento distinto. Na condição de 1,70 bar e ausência de água, este catalisador apresentou a maior fração de hidrocarbonetos entre as condições

correspondentes à menor pressão, totalizando 60,80%. Além disso, a presença de água, embora tenha reduzido a formação de hidrocarbonetos saturados, apresentou um efeito menor sobre a fração total de hidrocarbonetos na maior pressão. Esse comportamento sugere que o carvão ativado pode oferecer maior estabilidade da distribuição de produtos frente à presença de água.

De forma geral, os resultados indicam que a condição anidra é mais favorável à formação de hidrocarbonetos, principalmente em sistemas operando com maior pressão. Entre as condições analisadas, o sistema NiMo/Al_2O_3 a 6,46 bar e sem água apresentou o melhor desempenho em termos de conversão e formação de hidrocarbonetos, enquanto o NiMo/AC apresentou comportamento particularmente favorável em condições de menor pressão e maior resistência às alterações provocadas pela adição de água.

Assim, os resultados demonstram que a escolha do suporte catalítico e o controle das condições reacionais são essenciais para direcionar a conversão do ácido oleico para produtos de interesse. A formação predominante de hidrocarbonetos, especialmente saturados, evidencia o potencial dos catalisadores NiMo estudados para a produção de combustíveis renováveis a partir de matérias-primas lipídicas.

Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram que os catalisadores NiMo/Al_2O_3 e NiMo/AC apresentaram atividade na conversão do ácido oleico, com conversões superiores a 75% nas condições avaliadas. Entretanto, a análise da distribuição dos produtos evidenciou que a conversão do ácido oleico, isoladamente, não é suficiente para determinar o melhor desempenho catalítico, uma vez que o suporte, a pressão inicial e a presença de água influenciaram tanto a conversão quanto o direcionamento da reação e a formação dos produtos.

A ausência de água mostrou-se mais favorável à formação de hidrocarbonetos. Na condição de 1,70 bar e sem adição de água, o sistema NiMo/AC apresentou 60,80% de hidrocarbonetos na distribuição dos produtos. Para o sistema NiMo/Al_2O_3, o aumento da pressão de 1,70 para 6,46 bar, em condição anidra, favoreceu a formação de hidrocarbonetos, resultando em 91,03% de conversão do ácido oleico e 74,66% de hidrocarbonetos, correspondendo à condição com maior fração de hidrocarbonetos entre as avaliadas.

A adição de 5% de água provocou alterações na distribuição dos produtos, principalmente para o sistema NiMo/Al_2O_3. Na pressão de 6,46 bar, a presença de água reduziu a fração de hidrocarbonetos e aumentou a participação de compostos oxigenados, indicando que a composição do meio reacional exerce influência relevante sobre o direcionamento da reação. O NiMo/AC apresentou menor alteração na fração total de hidrocarbonetos com a adição de água na maior pressão, indicando comportamento distinto dos suportes quanto à influência das condições aquosas.

A análise da composição da fração de hidrocarbonetos saturados confirmou a formação de diferentes compostos, com predominância do hexadecano, correspondente a 23,39 wt% da composição analisada, seguido pelo dodecano e pelo n-nonilciclohexano. A presença desses diferentes compostos evidencia a capacidade dos sistemas catalíticos avaliados de promover a conversão do ácido oleico em hidrocarbonetos de diferentes estruturas e tamanhos de cadeia.

Conclui-se que o desempenho dos catalisadores NiMo é dependente tanto do suporte empregado quanto das condições reacionais, sendo necessário considerar conjuntamente a conversão do ácido oleico e a distribuição dos produtos para avaliar a eficiência dos sistemas catalíticos. Entre as condições estudadas, o sistema NiMo/Al_2O_3 a 6,46 bar e na ausência de água apresentou o desempenho mais favorável, considerando simultaneamente a conversão do ácido oleico e a formação de hidrocarbonetos. Os resultados obtidos reforçam o potencial dos catalisadores à base de NiMo para a conversão de matérias-primas lipídicas em hidrocarbonetos de interesse, contribuindo para o desenvolvimento de rotas catalíticas voltadas à produção de combustíveis renováveis.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e pela concessão da bolsa de iniciação científica, que contribuíram para a realização e o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

1. CASTRO, Allan Coelho de; ANDRADE, Vinícius Agostinho de; FERREIRA, Vinícius Lima. Produção de combustível renovável de aviação através de processos hidrotérmicos utilizando óleo de mamona. 2019.
2. DU, Xiangze et al. Molybdenum carbide as catalyst in biomass derivatives conversion. Journal of Energy Chemistry, v. 73, p. 68–87, 2022.
3. GOSSELINK, Robert W.; HOLLAK, Stefan A. W.; CHANG, Shu-Wei; VAN HAVEREN, Jacco; DE JONG, Krijn P.; BITTER, Johannes H.; VAN ES, Daan S. Reaction pathways for the deoxygenation of vegetable oils and related model compounds. ChemSusChem, v. 6, n. 9, p. 1576–1594, 2013. DOI: https://doi.org/10.1002/cssc.201300370.
4. KAEWMEESRI, R.; SRIFA, A.; ITTHIBENCHAPONG, V.; FAUNGNAWAKIJ, K. Deoxygenation of waste chicken fats to green diesel over Ni/Al_2O_3: Effect of water and free fatty acid content. Energy & Fuels, v. 29, p. 833–840, 2015. DOI:https://doi.org/10.1021/ef5023362.
5. KNOTHE, G. Biodiesel and renewable diesel: a comparison. Progress in Energy and Combustion Science, v. 36, n. 3, p. 364–373, 2010.
6. KROBKRONG, N.; ITTHIBENCHAPONG, V.; KHONGPRACHA, P.; FAUNGNAWAKIJ, K. Deoxygenation of oleic acid under an inert atmosphere using molybdenum oxide-based catalysts. Energy Conversion and Management, v. 167, p. 1–8, 2018. DOI:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.079.
7. LIU, Y.; ZHENG, D.; YU, H.; LIU, X.; YU, S.; WANG, X.; LI, L.; PANG, J.; LIU, X.; YAN, Z. Rapid and green synthesis of SAPO-11 for deoxygenation of stearic acid to produce biodiesel fractions. Microporous and Mesoporous

Materials, v. 303, p. 110280, 2020. DOI:https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110280.
8. LUCANTONIO, Stefania et al. Green diesel production via deoxygenation process: a review. Energies, v. 16, n. 2, p. 844, 2023.
9. MUKUNDAN, Swathi et al. Highly active and robust Ni–MoS_2 supported on mesoporous carbon: a nanocatalyst for hydrodeoxygenation reactions. RSC Advances, v. 9, n. 30, p. 17194–17202, 2019.
10. PIMENTA, João Lourenço Castagnari Willimann et al. Deoxygenation of vegetable oils for the production of renewable diesel: improved aerogel based catalysts. Fuel, v. 290, p. 119979, 2021.
11. SHI, Ze et al. Hydrotreating lipids for aviation biofuels derived from extraction of wet and dry algae. Journal of Cleaner Production, v. 204, p. 906–915, 2018.
12. VERIANSYAH, B.; HAN, J. Y.; KIM, S. K.; HONG, S. A.; KIM, Y. J.; LIM, J. S.; SHU, Y. W.; OH, S. G.; KIM, J. Production of renewable diesel by hydroprocessing of soybean oil: Effect of catalysts. Fuel, v. 94, p. 578–585, 2012. DOI:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.057.

Anexos

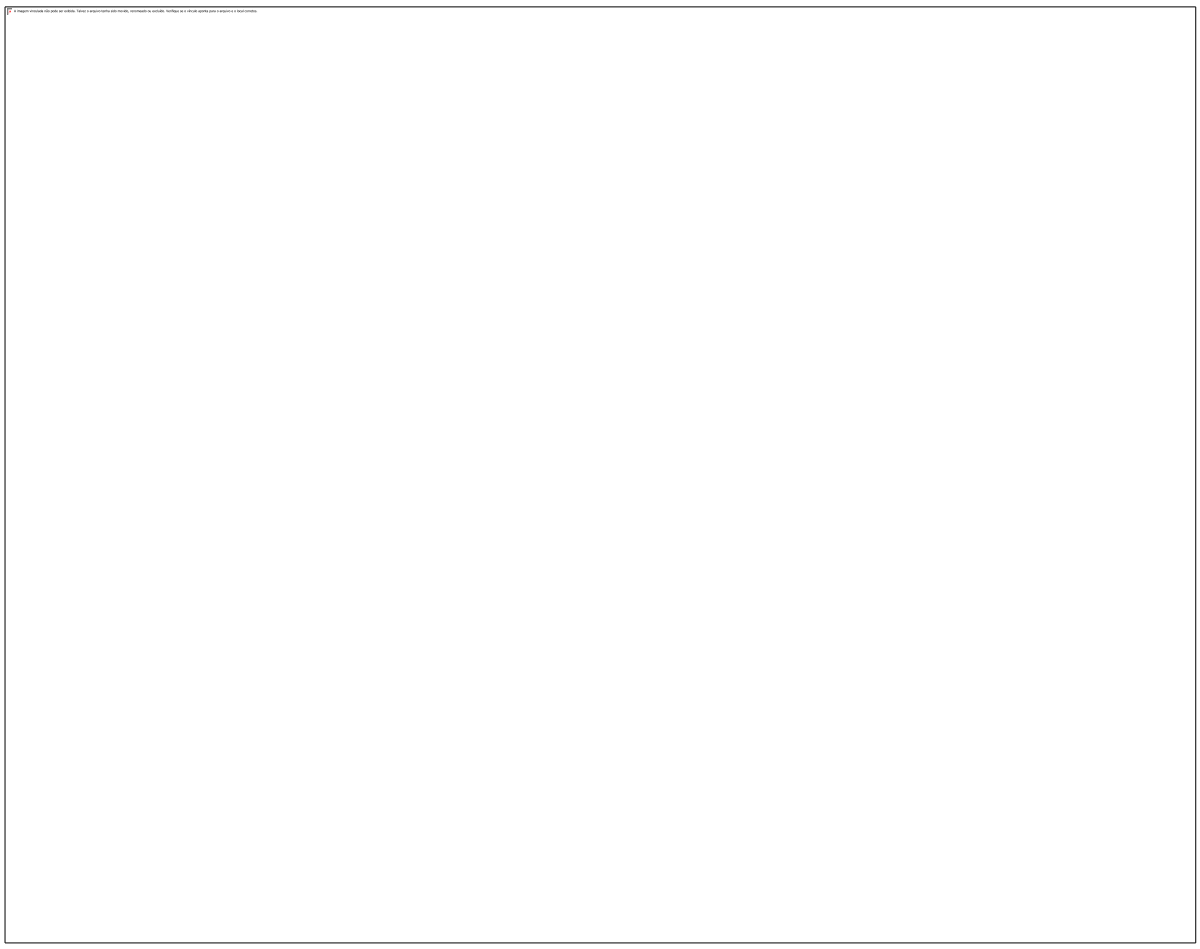


Figura 1- Aparato experimental

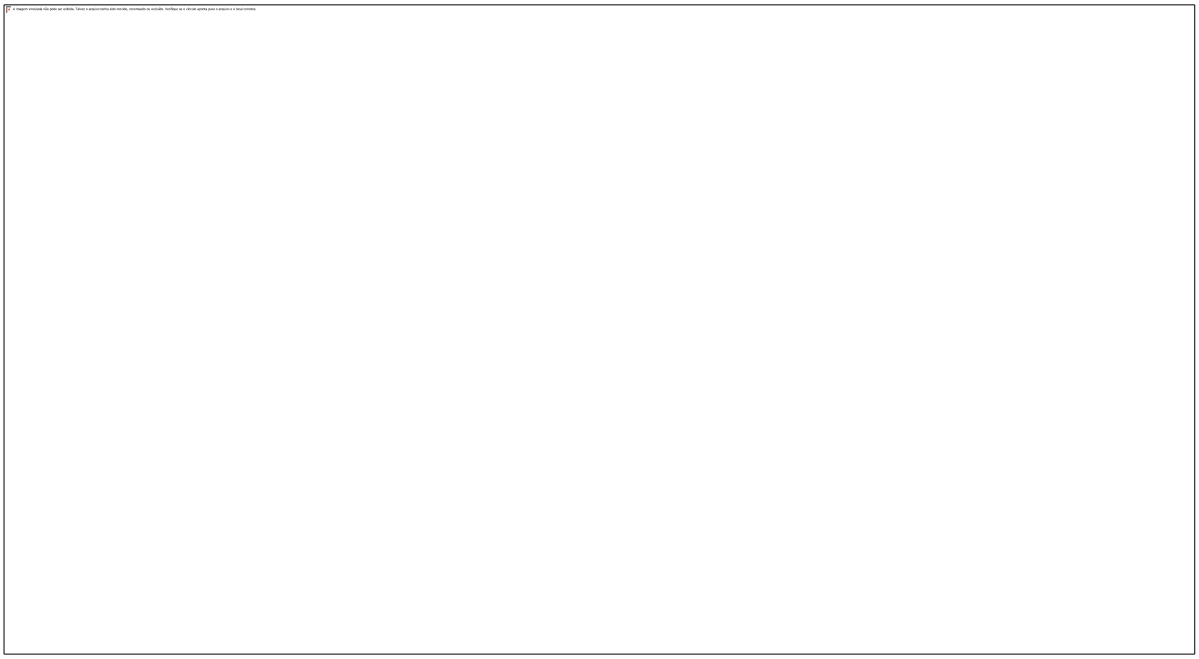


Tabela A- Tabela de ensaios experimentais

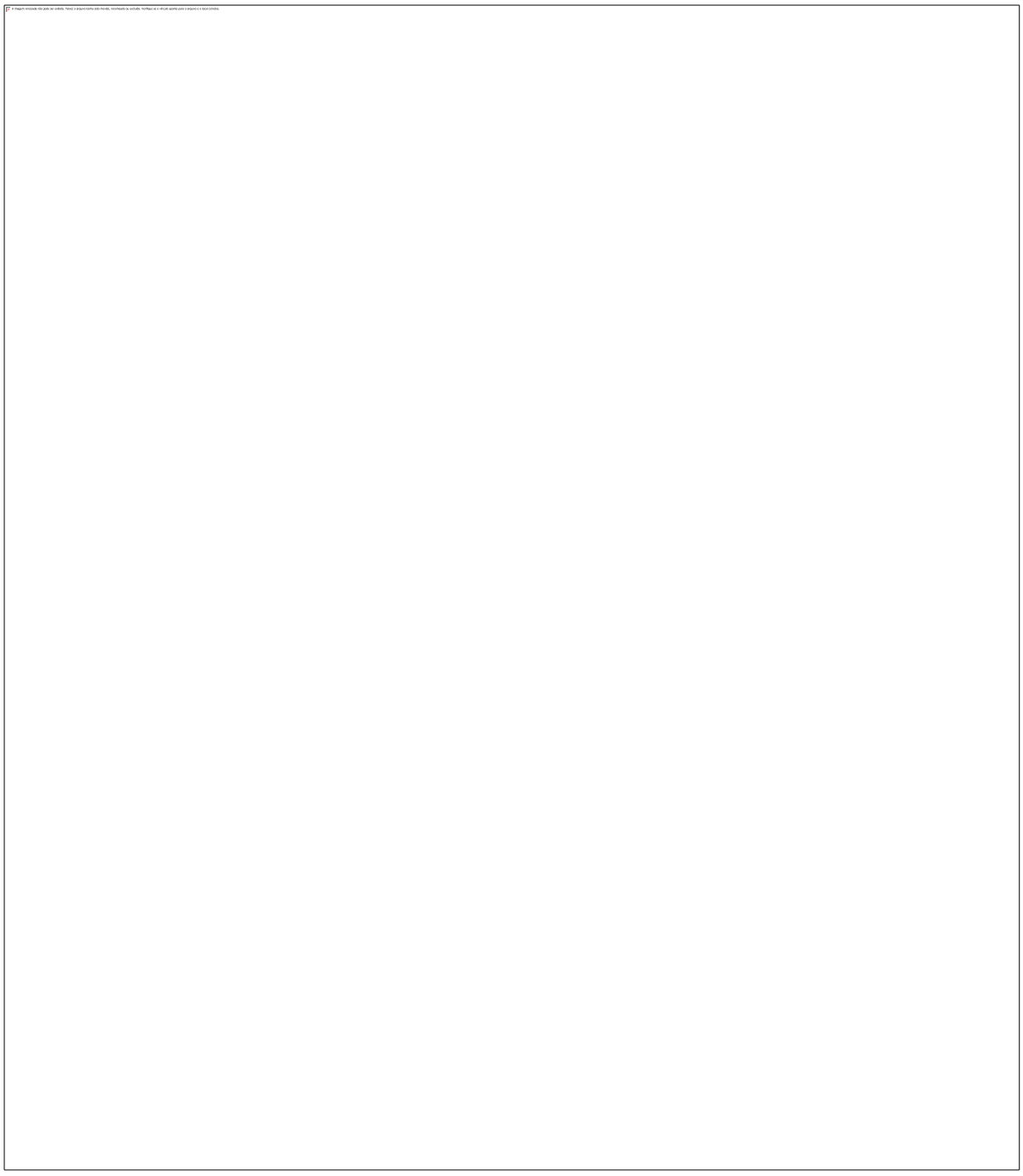


Tabela 1 - Condições experimentais e resultados da conversão do ácido oleico

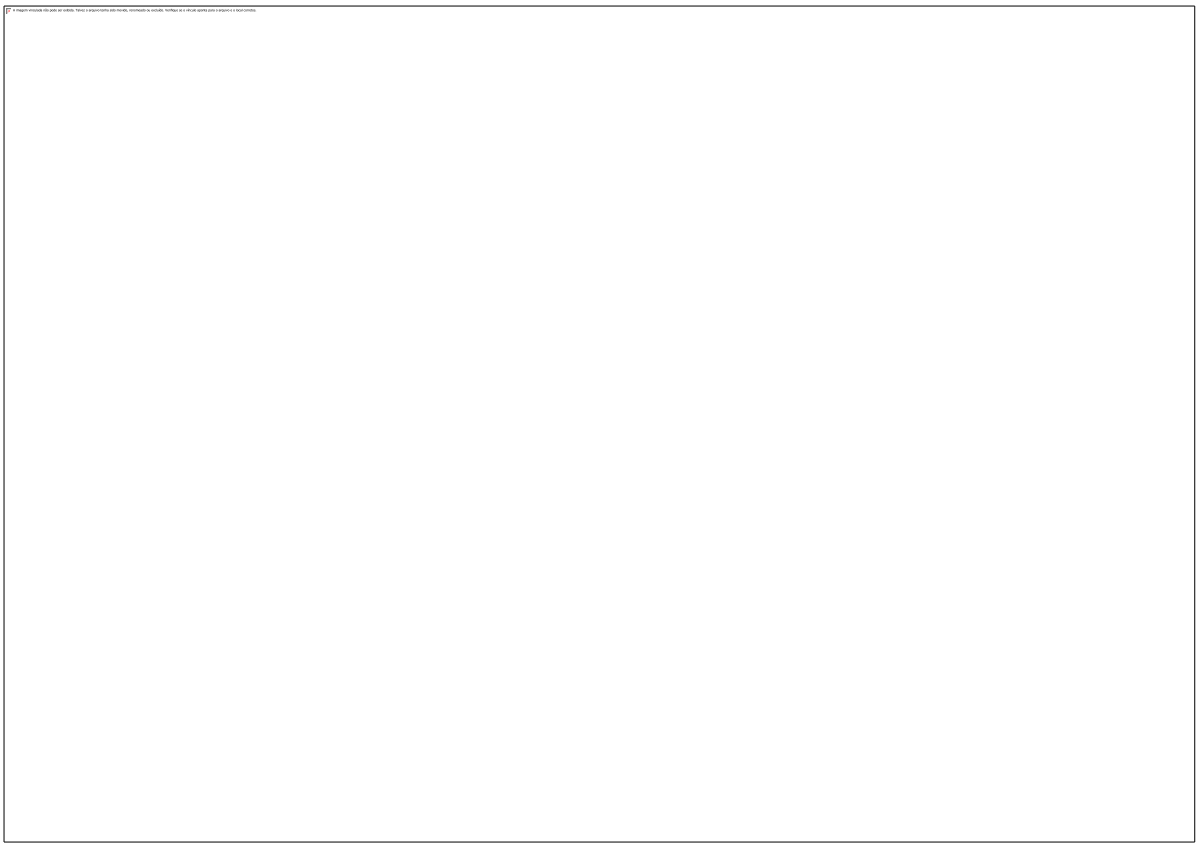


Gráfico 1- Distribuição dos produtos da reação de conversão do ácido oleico a 1,70 bar

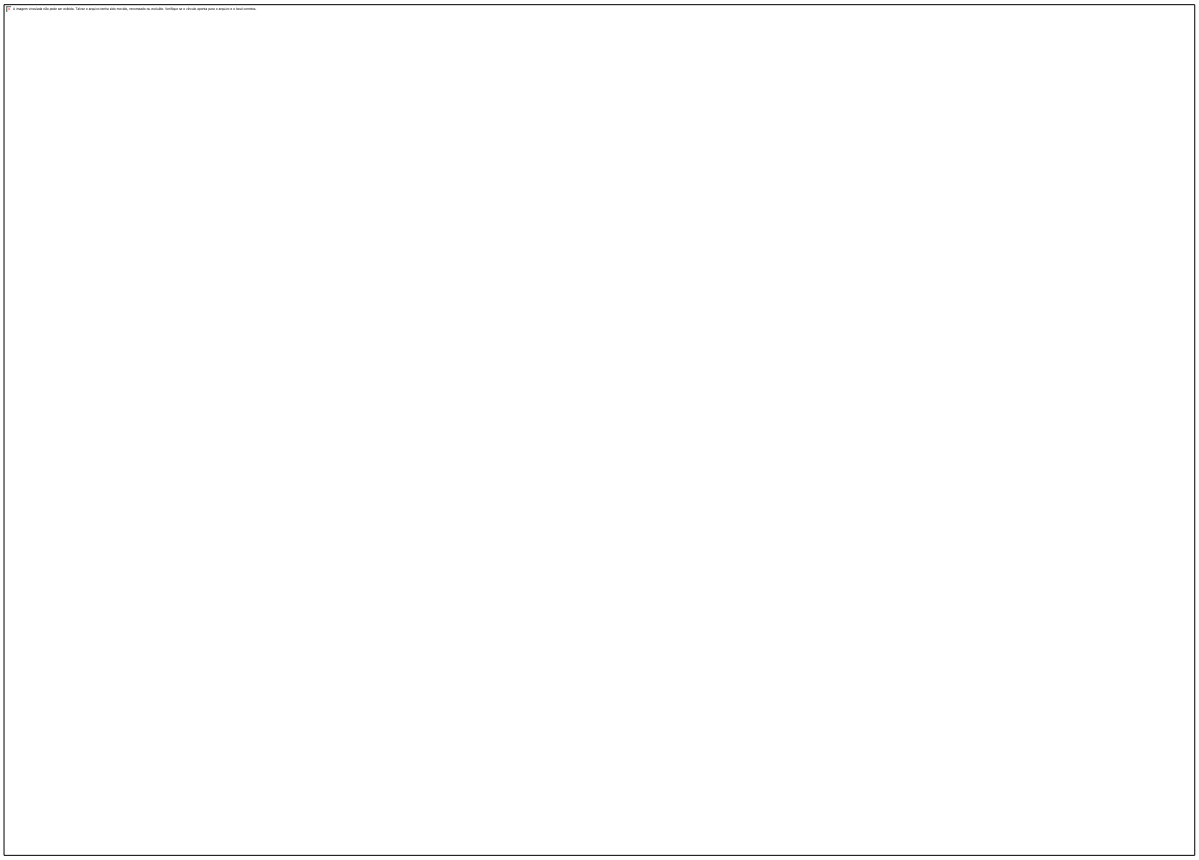


Gráfico 2- Distribuição dos produtos da reação de conversão do ácido oleico a 6,46 bar



Tabela 2 - Distribuição dos principais produtos obtidos na reação de conversão do ácido oleico

CÓDIGO: ET0129

AUTOR: VAGNER CABRAL DE SANTANA

COAUTOR: WEBER ANSELMO DOS RAMOS SOUZA

ORIENTADOR: CARINA MAIA LINS COSTA

TÍTULO: Caracterização estatística de frações granulométricas de um rejeito filtrado oriundo da mineração de ferro

Resumo

A busca por práticas mais seguras e sustentáveis na mineração levou à adoção do empilhamento a seco de rejeitos filtrados em substituição aos barramentos convencionais, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU, em especial ao ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura) e ODS 12 (Consumo e produção responsáveis). O sucesso dessa técnica depende de fatores como a compreensão da variabilidade granulométrica e do uso de métodos estatísticos no controle de qualidade (CQ). Este trabalho realizou uma caracterização estatística das curvas granulométricas de um rejeito filtrado de minério de ferro, avaliando a dispersão das frações de areia e de finos segundo diferentes critérios. A ordem de classificação da variabilidade das frações analisadas por diferentes métricas estatísticas foi consistente e pouco influenciada pelas observações localizadas nas caudas da distribuição. Entre as frações arenosas, a areia média apresentou a maior variabilidade relativa, com coeficiente de variação da ordem de 30%. Em relação à presença de finos, os ultrafinos destacaram-se pela elevada variabilidade e acentuada assimetria positiva. Em geral, os resultados revelaram que o CQ não deve se restringir ao teor de finos, sugerindo a adoção de indicadores para as frações arenosas e o monitoramento dos ultrafinos por métricas baseadas em quartis.

Palavras-chave: Rejeito filtrado. Variabilidade granulométrica. Controle de qualidade.

TITLE: Statistical characterization of particle size fractions of filtered iron ore tailings

Abstract

The search for safer and more sustainable practices in mining has led to the adoption of dry stacking of filtered tailings as a replacement for conventional

dams, aligning with the UN 2030 Agenda's Sustainable Development Goals, particularly SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production). The success of this technique relies on factors such as understanding particle size variability and applying statistical methods in quality control (QC). This study conducted a statistical characterization of the particle size distribution curves of filtered iron ore tailings, evaluating the dispersion of sand and fine fractions according to different criteria. The ranking order of variability for the analyzed fractions across different statistical metrics was consistent and little influenced by observations located in the distribution tails. Among the sandy fractions, medium sand exhibited the highest relative variability, with a coefficient of variation of around 30%. Regarding the fine content, the ultrafines stood out due to their high variability and pronounced positive skewness. Overall, the results revealed that QC should not be restricted to the fines content, suggesting the adoption of indicators for sandy fractions and the monitoring of ultrafines through quartile-based metrics.

Keywords: Filtered tailings. Particle size variability. Quality control.

Introdução

O setor de mineração possui uma expressiva parcela de participação na economia brasileira. Conforme dados divulgados pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2025), no 3º trimestre de 2025 o setor faturou cerca de R$76 bilhões, com o minério de ferro representando cerca de 52% do faturamento total. Em termos de produção, dados expostos por Bocanegra (2025) mostraram que apenas uma das principais mineradoras do país reportou uma produção de cerca de 94 milhões de toneladas no mesmo ano, registrando o maior volume desde 2018.

Essa quantidade de produção de minério de ferro tem como consequência uma geração proporcional de rejeitos após o processo de beneficiamento, cujo gerenciamento representa um dos principais desafios da indústria de mineração. Esse cenário tem como principais agravantes o recente histórico de falhas catastróficas associadas ao método tradicional de disposição desses resíduos em barragens, com trágico destaque para os rompimentos dessas estruturas acontecidos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), no estado de Minas Gerais.

Tais eventos resultaram em restrições legais para a utilização do método de descarte de rejeitos de mineração em barragens, exigindo soluções mais seguras e com menor impacto ambiental (Wagner et al., 2024). Neste contexto, o empilhamento a seco de rejeitos filtrados consolidou-se como uma das alternativas mais promissoras, pois permite que o material seja compactado e disposto em estado não saturado, diminuindo os riscos de liquefação em comparação às estruturas de barramento anteriormente adotadas (Santos et al., 2024).

Apesar de representar uma solução mais segura, o sucesso a longo prazo das pilhas de rejeitos filtrados exige um controle geotécnico rigoroso e uma boa

compreensão do comportamento do material (Amorim et al., 2024), pois a execução dessas estruturas depende da compactação em camadas, um processo que é complexo devido à inerente variabilidade do rejeito. Diferentemente da variabilidade típica dos solos, o rejeito filtrado é um produto antrópico (Silva et al., 2024), cujas propriedades podem variar de acordo com as oscilações do processo de beneficiamento.

Estudos demonstram que os rejeitos de minério de ferro podem exibir propriedades geotécnicas altamente variáveis (Bruschi et al., 2025). De acordo com Wagner et al. (2024), a variação no teor de finos afeta características relacionadas à compactação, rigidez e deformabilidade. Outros parâmetros, como a granulometria e a composição química, também variam e impactam os parâmetros de controle, como a densidade do rejeito (Eloi et al., 2024). A própria compactação pode atuar como uma fonte adicional de variabilidade, uma vez que a energia aplicada pelos equipamentos de campo é capaz de provocar a quebra de partículas (Wagner et al., 2023), alterando a distribuição granulométrica do material e, consequentemente, modificando seu comportamento mecânico e hidráulico.

Apesar do crescente interesse na literatura técnica sobre o comportamento geotécnico de rejeitos filtrados de minério de ferro, identificado em estudos recentes (Ex: Filho et al., 2025; Pereira, 2024; Telles et al., 2019), existe uma lacuna quanto à análise estatística da variabilidade granulométrica desse material. Mesmo com o entendimento de que a variação das frações de areia e finos é relevante, poucos estudos quantificam e exploram métricas estatísticas utilizadas para descrever essa heterogeneidade nas rotinas de monitoramento industrial.

Diante disso, o objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise estatística da variabilidade granulométrica de rejeitos filtrados de minério de ferro, utilizando como base de dados o estudo de caso apresentado por Eloi et al. (2024). De forma mais específica, busca-se quantificar e comparar a heterogeneidade das diferentes frações granulométricas e avaliar a aplicabilidade de diferentes métricas de dispersão para a correta interpretação dos dados em rotinas de controle de qualidade (CQ).

Metodologia

A metodologia de trabalho foi organizada em três principais etapas: aquisição e descrição dos dados; processamento e determinação de diferentes frações granulométricas do rejeito; e análise estatística.

AQUISIÇÃO E DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS

A primeira etapa consistiu em uma busca sistemática em bases indexadoras, com o objetivo de identificar artigos científicos que apresentassem dados de granulometria de rejeitos filtrados de minério de ferro. Após essa etapa, selecionou-se o trabalho de Eloi et al. (2024), referente a um estudo de caso

voltado ao controle geotécnico de pilhas de rejeito filtrado de minério de ferro no Brasil. Esse trabalho foi considerado por apresentar o maior conjunto de resultados disponível, totalizando 25 ensaios granulométricos, o que possibilitou a realização das análises estatísticas propostas. As amostras de rejeito foram coletadas na planta de filtração ao longo de um período contínuo de 24 horas, em 2024. Para cada amostra, a distribuição granulométrica foi determinada por meio da técnica de granulometria a laser. As curvas granulométricas não foram apresentadas no trabalho de Eloi et al. (2024). Os dados disponíveis consistiam na porcentagem retida não acumulada em diferentes intervalos de tamanhos de partículas.

PROCESSAMENTO DE DADOS E CÁLCULO DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Os dados foram inicialmente processados para permitir a obtenção das curvas granulométricas a partir da porcentagem retida não acumulada de material. A plotagem das curvas granulométricas foi realizada utilizando-se códigos computacionais em linguagem *Python* executados no ambiente *Google Colaboratory* para garantir maior precisão nessa fase de processamento. Com base nesses códigos, as curvas granulométricas foram construídas por meio de interpolação log-linear. Na sequência, os mesmos *scripts* foram empregados para plotar cada curva interpolada e para quantificar o percentual de massa associado às diferentes frações granulométricas. Todos os resultados foram ainda conferidos visualmente pela análise das curvas plotadas.

Após esses procedimentos, foram definidas as frações granulométricas a serem analisadas de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 6502:2022, com o intuito de classificação das frações equivalentes a areias em média e fina. Quanto à fração de finos, foram adotados múltiplos critérios, permitindo uma análise comparativa e abrangente: o limite padrão da própria ABNT; o critério apresentado no *Bulletin* 181 da *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 2021), frequentemente aplicado a rejeitos de mineração; e a definição de ultrafinos proposta por Barra et al. (2025).

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para avaliar a variabilidade da granulometria do rejeito, realizou-se uma análise estatística descritiva das frações do rejeito associadas a diferentes faixas de diâmetro de partículas. Inicialmente, foram calculados os parâmetros fundamentais de tendência central e dispersão: média ($\bar{x}$), mediana (Md), desvio padrão (s), amplitude e os quartis. Em seguida, calculou-se o coeficiente de variação (CV), definido pela razão entre o desvio padrão e a média, conforme a Equação 1:

Eq. (1)

A magnitude dos coeficientes de variação foi avaliada segundo as diretrizes apresentadas por Zevgolis et al. (2018), que remete aos critérios de Harr (1987). Assim, valores de CV inferiores a 10% foram interpretados como indicativos de baixa variabilidade, valores entre 15% e 30% como variabilidade moderada, e

valores superiores a 30% como alta variabilidade. Essas faixas fornecem um critério para interpretar, de forma comparativa, a heterogeneidade das frações granulométricas ao longo do monitoramento operacional.

Para contornar a sensibilidade do CV a valores extremos e à assimetria da distribuição, foi calculado como medida complementar o Intervalo interquartil relativo (IQRrelativo), conforme a Equação 2:

Eq. (2)

Onde: Q1 é o primeiro quartil; Q2 é o segundo quartil e Q3 é o terceiro quartil.

Por fim, para investigar a simetria da distribuição granulométrica dentro do intervalo interquartil, foi calculado o coeficiente de assimetria de Bowley (Sk), conforme Equação 3:

Eq. (3)

Cabe ressaltar que a identificação da presença de outliers nos diagramas de caixa foi feita através do critério de Tukey. Os limites superiores e inferiores foram obtidos pelas Equações 4 e 5, respectivamente:

Eq. (4)

Eq. (5)

Onde Q1 e Q3 representam o primeiro e o terceiro quartis, respectivamente, e IQR é a diferença entre Q3 e Q1.

Resultados e Discussões

A Figura 1 apresenta as 25 curvas granulométricas obtidas após o processamento dos dados. A curva C1 representa o início do monitoramento, com horário de 05h30 no dia 27/06, enquanto a curva C25 corresponde ao encerramento desse ciclo de 24 horas (28/06, às 05h30).

[FIGURA 1]

De forma geral, é possível observar que o rejeito apresenta uma distribuição granulométrica compreendida, em sua maior parte, entre areia fina e finos (silte e argila), com cerca de 40% e 50% do material, respectivamente, de acordo com as diretrizes descritas na ABNT NBR 6502:2022.

Com relação à variabilidade, a Figura 1 mostra um comportamento de paralelismo entre as curvas, sugerindo que o processo operacional atua de forma estável ao longo do tempo, sem evidência de descontinuidades ou variações anormais. Apesar disso, com o maior afastamento entre amostras no intervalo de 0,02 mm a 0,15 mm, percebe-se que há oscilações, justificando o uso de métodos estatísticos para avaliar esse comportamento.

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva das porcentagens retidas não acumuladas em cada faixa granulométrica para o rejeito de minério de ferro filtrado. Com base nos dados de granulometria e na ausência de plasticidade reportada na literatura para o tipo de rejeito em estudo, é possível enquadrar o rejeito filtrado segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Assim, a partir da predominância da matriz granular fina e na porcentagem passante na peneira de número #200, o rejeito é classificado tipicamente como silte arenoso (ML).

A Tabela 1 permite ainda identificar as composições médias do material e comparar a variabilidade absoluta e relativa de cada fração granulométrica. A comparação dos coeficientes de variação das porcentagens retidas pode permitir a identificação de faixas granulométricas com dispersão relativa discrepante. Um CV substancialmente superior ao das demais classes constitui indício de variabilidade localizada nessa região da curva que merece maior investigação.

[TABELA 1]

Todas as faixas granulométricas apresentadas na Tabela 1 apresentaram variabilidade própria. Ressalta-se que para as faixas de rejeito com valores médios inferiores a 5% (faixas F1 e F6), o coeficiente de variação deve ser interpretado com cautela, pois a baixa magnitude da média, utilizada no denominador para o cálculo do CV, pode produzir valores elevados de coeficiente de variação, mesmo diante de pequenas variações absolutas. Quando a porcentagem média de material é pequena, erros de amostragem, procedimentos de ensaio ou arredondamento passam a representar uma parcela relevante do valor medido.

A interpretação dos parâmetros da Tabela 1 indica que a porção mais grossa do rejeito, representada pela faixa F1, registrou o maior valor de CV, sendo a única faixa com alta variabilidade segundo os critérios de Zevgolis et al (2018). Porém, como discutido, esse resultado deve ser visto com cautela devido à baixa porcentagem média de rejeito retida na faixa F1 (inferior a 5%). Essa observação também é válida para o intervalo F6 cujo baixo valor médio da porcentagem retida, possivelmente, inflacionou a variabilidade relativa apesar do menor desvio-padrão entre as faixas mostradas na Tabela 1.

Ao desconsiderar essas distorções, a fração F2 se mostrou como o intervalo de maior instabilidade do processo. Essa faixa possui a maior dispersão absoluta e

o maior CV entre as frações, alertando para flutuações do material neste intervalo. Por outro lado, as faixas F4 e F5 se destacam pelos menores CV, configurando a zona de maior homogeneidade do rejeito. As demais classes, F3, F7, F8, F9 e F10, mantêm uma variabilidade moderada, com CVs situados na faixa de 13% a 18%.

Esses resultados trazem uma implicação prática para a engenharia de mineração: embora seja comum uma maior preocupação com o papel do teor de finos, a análise da homogeneidade do rejeito demonstra que o controle de qualidade não deve se restringir às frações passantes finas. A garantia de estabilidade nas pilhas de empilhamento a seco exige a adoção de indicadores que englobem toda a curva granulométrica.

A Tabela 2 apresenta a estatística descritiva do rejeito com as partículas agrupadas em frações de areia média, areia fina e finos, sendo esta última composta por siltes e argila, conforme a classificação granulométrica da ABNT NBR 6502:2022.

[TABELA 2]

Conforme os dados de tendência central, observa-se que o material é predominantemente composto por finos, sendo este intervalo responsável por integrar cerca de metade da composição. Ademais, a fração de areia fina representa a segunda parcela mais significativa, seguida pela fração de areia média, que é a menos representativa. Cabe destacar também a ausência de partículas que se enquadram na fração de areia grossa.

A avaliação das medidas de dispersão evidencia uma heterogeneidade entre as frações granulométricas: embora a fração de finos apresente a maior dispersão absoluta, com o maior desvio padrão, a análise da variabilidade relativa aponta para um comportamento diferente. A fração de areia média exibe a maior dispersão relativa, com CV correspondente à alta variabilidade de acordo com Zevgolis et al (2018), embora com valor bem próximo à fronteira entre moderada e alta variabilidade. Esse valor indica, novamente, que a proporção desta fração mais grossa é a mais heterogênea entre as amostras coletadas. Tal resultado sugere que, apesar da menor proporção de areia média (cerca de 10% do rejeito), essa fração também deve ser considerada para o aprimoramento de rotinas de controle de qualidade durante a produção de rejeitos filtrados de mineração de ferro.

Por outro lado, a fração de areia fina apresentou dados com maior consistência, possuindo o menor valor de CV, sendo definida como variabilidade moderada. Os finos apresentaram também um valor de CV que o enquadra como moderada variabilidade.

A Figura 2 ilustra a distribuição das porcentagens de cada fração granulométrica, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 6502:2022, por meio de diagramas de caixa.

[FIGURA 2]

Em termos de amplitude absoluta, a fração dos finos mostra a caixa mais alongada entre os diagramas, refletindo a maior variabilidade absoluta observada no monitoramento, seguida pela classe da areia fina. Porém, o aspecto mais relevante diz respeito ao posicionamento das medianas, pois confirmam os índices de assimetria calculados mostrados na Tabela 2.

O coeficiente de *Bowley* calculado para a fração de finos permite caracterizar essa faixa como assimétrica à direita, sendo evidenciada pela linha da mediana posicionada ligeiramente mais próxima à parte inferior do diagrama de caixa. Isso mostra que, embora o teor de finos se concentre em valores menores, no processo de beneficiamento e filtragem há eventos em que a presença de partículas mais finas se eleva, aumentando o bigode da distribuição para o limite superior do gráfico.

Por outro lado, as frações de areia fina e areia média exibiram coeficientes de assimetria negativos, evidenciando uma assimetria à esquerda. Graficamente, essa observação se revela pelo deslocamento da linha da mediana em direção à parte superior de suas respectivas caixas. Esse padrão indica que o rejeito filtrado tende a manter teores de areia fina e média operando de forma estável perto de seus limites superiores, ocorrendo reduções nesses teores de maneira mais esporádica.

A ausência de outliers nas três frações indica que as oscilações do material ocorrem de forma contínua e dentro dos limites esperados para a planta.

A Figura 3 apresenta uma análise comparativa entre os valores de coeficiente de variação e intervalo interquartílico relativo das frações, também de acordo com a classificação da ABNT NBR 6502:2022. Para a amostra analisada, a comparação entre o coeficiente de variação e o IQR relativo permite avaliar a estabilidade do ranking de variabilidade relativa entre as diferentes frações granulométricas. O CV incorpora a dispersão de todas as observações em torno da média e, por isso, é mais sensível à assimetria, ao comportamento das caudas da distribuição e à eventual presença de valores atípicos, enquanto o IQR relativo representa predominantemente a dispersão relativa dos 50% centrais dos dados.

[FIGURA 3]

A análise deste gráfico mostra uma boa concordância para as frações analisadas. Ambos os critérios indicaram o mesmo ranking de variabilidade: a fração de areia fina possui a maior estabilidade e consistência operacional, apresentando os menores valores em ambas as métricas, seguida pela fração de finos com dispersão moderada, e pela areia média, que registra os maiores níveis de variação.

Assim, a manutenção da mesma ordem entre as frações por ambas as métricas indica que o ranking é robusto em relação à medida estatística adotada e não depende substancialmente do comportamento das caudas.

Com relação aos finos, a Tabela 3 apresenta a estatística descritiva para o conjunto de dados avaliados a partir de três critérios: porcentagem de finos, seguindo a classificação da ABNT NBR 6502:2022 e do ICOLD (2021); e para a fração de ultrafinos, conforme a classificação de Barra et al. (2025).

[TABELA 3]

A análise das medidas de tendência central mostra que a maior representatividade média de finos se dá pela classificação da ICOLD. Este resultado é esperado, pois seu critério abrange um diâmetro de partícula maior quando comparado ao da ABNT NBR 6502:2022. Apesar dessa diferença nos valores médios, as medidas de variabilidade para os dois critérios são próximas, se enquadrando como moderada variabilidade e indicando que a interpretação da homogeneidade da fração de finos não é significativamente alterada pelo critério adotado.

A fração de ultrafinos representou o menor valor de média do rejeito e se destaca por apresentar o maior valor CV entre os intervalos granulométricos, indicando que sua proporção é mais heterogênea entre as amostras e se configura como moderada variabilidade, alertando para uma maior necessidade controle das partículas passantes na peneira de abertura de 0,010 mm.

A Figura 4 apresenta os diagramas de caixa para as frações já definidas na Tabela 3.

[FIGURA 4]

É possível observar que os intervalos definidos pela ABNT NBR 6502:2022 e pela ICOLD exibem extensões de caixas e comprimento de hastes semelhantes,

sendo essa semelhança confirmada também pelos coeficientes de *Bowley* encontrados na Tabela 3. Ambos os valores revelam uma assimetria à direita, caracterizada pelo posicionamento da mediana ligeiramente deslocada para a parte inferior do *box-plot*. Esse acontecimento reforça que a escolha entre esses dois critérios modifica a quantidade de finos, mas mantém a dispersão e simetria do processo.

Por outro lado, a fração de ultrafinos se destaca pelo comportamento distinto, registrando um elevado coeficiente de assimetria de *Bowley*. Esse valor mais elevado é visto pela linha da mediana muito próxima à parte inferior do diagrama de caixa. Levando em consideração o processo operacional, esse fenômeno indica a presença ultrafinos no rejeito filtrado em baixos valores, porém o processo é susceptível a episódios de variação em que a retenção dessa fração sofre com valores mais elevados, conforme mostrado no limite superior. Essa maior assimetria na obtenção de ultrafinos pode limitar a capacidade de métodos paramétricos representarem com fidelidade o comportamento desse intervalo do material.

A Figura 5 também apresenta uma comparação entre valores de CV e IQR relativo, porém agora para os diferentes critérios de frações finas.

[FIGURA 5]

A análise visual mostra um comportamento muito próximo das barras dos intervalos da ABNT NBR 6502:2022 e da ICOLD. Em ambos os casos, o IQR relativo está acima 20%, enquanto o CV varia entre 12% e 14%. Por outro lado, a classe de ultrafinos exibe os maiores valores de dispersão do gráfico para cada métrica considerada. A concordância entre as duas métricas, CV e IQR relativo, mostradas na Figura 5 quanto à ordenação das frações demonstra que a classificação da variabilidade relativa foi consistente e pouco influenciada pelas observações localizadas nas caudas da distribuição.

Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise da variabilidade granulométrica de um rejeito filtrado de minério de ferro descrito por Eloi et al. (2024). Foi avaliado o comportamento de diferentes faixas de tamanhos de partículas e a aplicação de métricas de dispersão, estabelecendo implicações para o monitoramento industrial. Destacam-se as seguintes conclusões:

- Os parâmetros de tendência central do rejeito mostraram um comportamento típico de silte arenoso (ML), segundo o SUCS, composto por aproximadamente

50% de finos e 40% de areia fina. A homogeneidade visual e o paralelismo das curvas granulométricas sugerem estabilidade operacional na planta de filtração ao longo do ciclo diário de produção.

- Todas as faixas granulométricas analisadas apresentaram variabilidade, sendo mais acentuada nas frações mais grossas. A faixa de diâmetros entre 0,15 e 0,25 mm apresentou o maior desvio padrão e um coeficiente de variação (CV) moderado. Para intervalos com partículas menores, observou-se menor dispersão, sem evidência de instabilidade isolada.

- A maior variabilidade relativa concentrou-se na fração de areia média, cujo CV se destacou em relação à areia fina e aos finos. Estes últimos apresentaram dispersões semelhantes e moderadas, indicando que, embora predominantes, os finos não apresentaram variabilidade relativa tão elevada.

- A transição da ABNT NBR 6502:2022 para o critério da ICOLD aumentou a porcentagem média de finos, mantendo a dispersão e a assimetria semelhantes. Porém, a classe de ultrafinos de Barra et al. (2025) apresentou maior dispersão e forte assimetria positiva. Para esta fração, recomenda-se o uso complementar de métodos baseados em quartis para reduzir possíveis distorções no controle de qualidade.

- O CV e o IQR relativo apresentaram boa concordância, convergindo para a mesma ordem de classificação da variabilidade das frações granulométricas. Isso evidencia que as dispersões observadas refletem a variabilidade do resíduo, sem distorções por valores extremos ou efeito de caudas.

Em geral, os resultados indicaram que o controle granulométrico baseado exclusivamente no teor de finos pode não ser suficiente para representar adequadamente a variabilidade do rejeito no contexto do controle de produção. Embora essa fração permaneça relevante por sua influência sobre propriedades geotécnicas importantes, a comparação dos coeficientes de variação mostrou que outras classes de tamanho podem apresentar oscilações relativas mais pronunciadas. Isso significa que mudanças significativas na distribuição granulométrica podem ocorrer sem alterações proporcionais no teor total de finos. Portanto, recomenda-se que o controle de produção considere, além dessa fração, pelo menos um indicador complementar associado às frações arenosas, especialmente àquelas que apresentem maior variabilidade relativa, mantendo-se também a verificação periódica da curva granulométrica completa.

Referências

AMORIM, D. G. et al. Experimental landfill of filtered iron ore flotation tailings at Minas-Rio system. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING (ECSMGE), 18., 2024, Lisbon. Proceedings...

London: CRC Press, 2024. p. 1430-1433. DOI: https://doi.org/10.1201/9781003431749-262.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6502:2022: Solos e rochas - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BARRA, M. F. et al. Key parameters affecting the compaction properties of filtered tailings. In: MINE WASTE AND TAILINGS CONFERENCE, 2025, Brisbane. Proceedings... Brisbane: AusIMM, 2025. p. 961-968[cite: 3].

BOCANEGRA, C. Vale (VALE3) tem produção de minério de ferro em maior nível desde 2018 no 3T25. InfoMoney, 21 out. 2025.

BRUSCHI, G. J. et al. Hydromechanical Behavior of Cement-Stabilized Iron Ore Tailings. Geotechnical and Geological Engineering, v. 43, n. 6, p. 292, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10706-025-03219-7.

ELOI, D. et al. Geotechnical Controls for Piles of Filtered Iron Ore Tailings. In: TAILINGS AND MINE WASTE CONFERENCE, 2024, Colorado. Proceedings... Colorado: University of Alberta, 2024. p. 441-452.

HARR, M. E. Reliability-Based Design in Civil Engineering. New York: McGraw-Hill, 1987. 290 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Faturamento da mineração cresce 34% no 3º trimestre e exportações alcançam US$ 12,2 bi. IBRAM, 2025. Disponível em: https://ibram.org.br/noticia/faturamento-da-mineracao-cresce-34-no-3otrimestre-e-exportacoes-alcancam-us-12-bi/. Acesso em: 8 jun. 2026.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Bulletin 181: Tailings Dam Design: Technology Update. Paris: ICOLD, 2021.

PEREIRA, L. M. M. Estudo de propriedades geotécnicas de um rejeito de minério de ferro filtrado compactado para empilhamento a seco. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

RIBEIRO FILHO, A. M. et al. Influência do cimento de baixo carbono no empilhamento do rejeito de minério de ferro. In: ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO (ENARC), 9., 2025, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ENARC, 2025. p. 1-8.

SANTOS, R. A. et al. Influence of initial compaction and confining pressure on the hydraulic conductivity of compacted iron ore tailings. E3S Web of Conferences, v. 544, p. 14005, 2024. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454414005.

SILVA, J. P. S. et al. Triaxial testing response of compacted iron ore tailings considering a broad spectrum of confining pressures. Soils and Foundations, v. 64, n. 2, p. 101438, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101438.

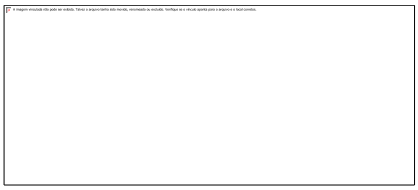
TELLES, A. C. et al. Influência do teor de finos no comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DISPOSIÇÃO E REJEITOS, 2019. Anais... 2019.

WAGNER, A. C. et al. Dry stacking of iron ore tailings: possible particle breakage during compaction. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, v. 177, n. 6, p. 779-787, 2023.

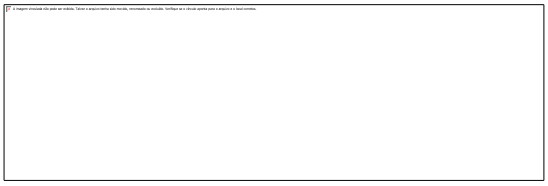
WAGNER, A. C. et al. Comportamento Geotécnico de Misturas de Rejeito de Minério de Ferro. In: Tópicos em Geotecnia e Mineração. Balneário Camboriú: Editora Omnis Scientia, 2024.

ZEVGOLIS, I. E. et al. Evaluation of geotechnical property variability: The case of spoil material from surface lignite mines. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, 2018. Proceedings... Kozani, 2018. Disponível em: <www.safekozani.gr>.

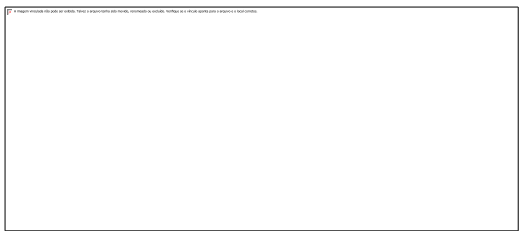
Anexos



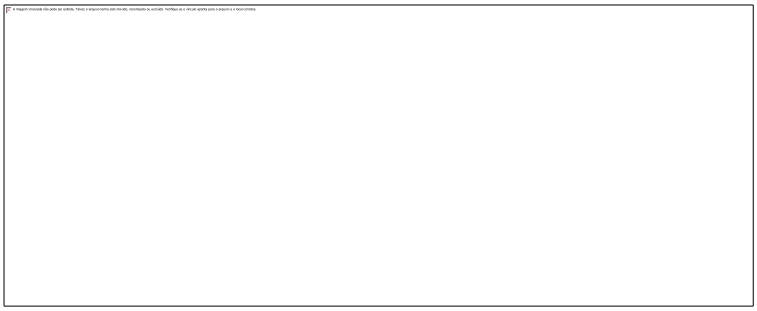
Equação 1



Equação 2



Equação 3



Equações 4 e 5

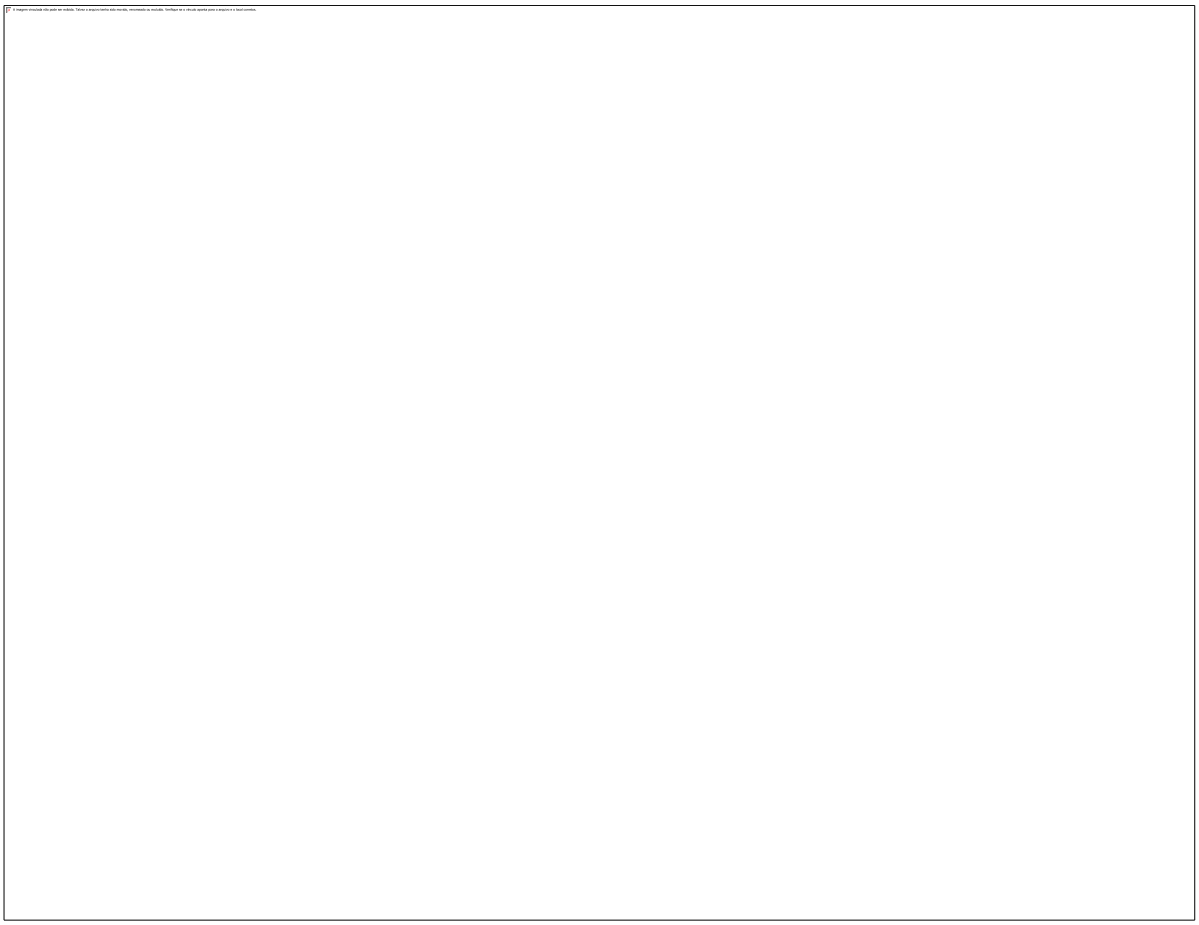


Figura 1: Curvas granulométricas do rejeito filtrado



Tabela 1: Estatística descritiva da porcentagem retida do rejeito em diferentes faixas granulométricas

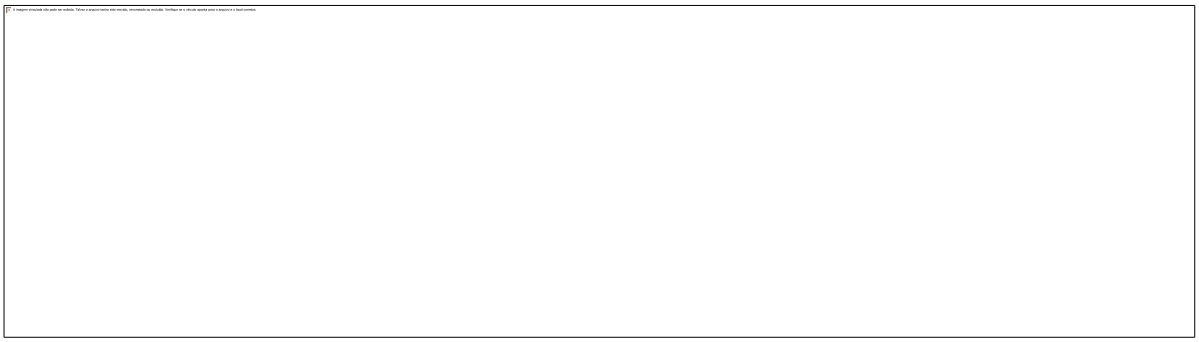


Tabela 2: Estatística descritiva das porcentagens de areia e finos do rejeito



Figura 2: Diagramas de caixa das frações de finos, areia fina e areia média do rejeito

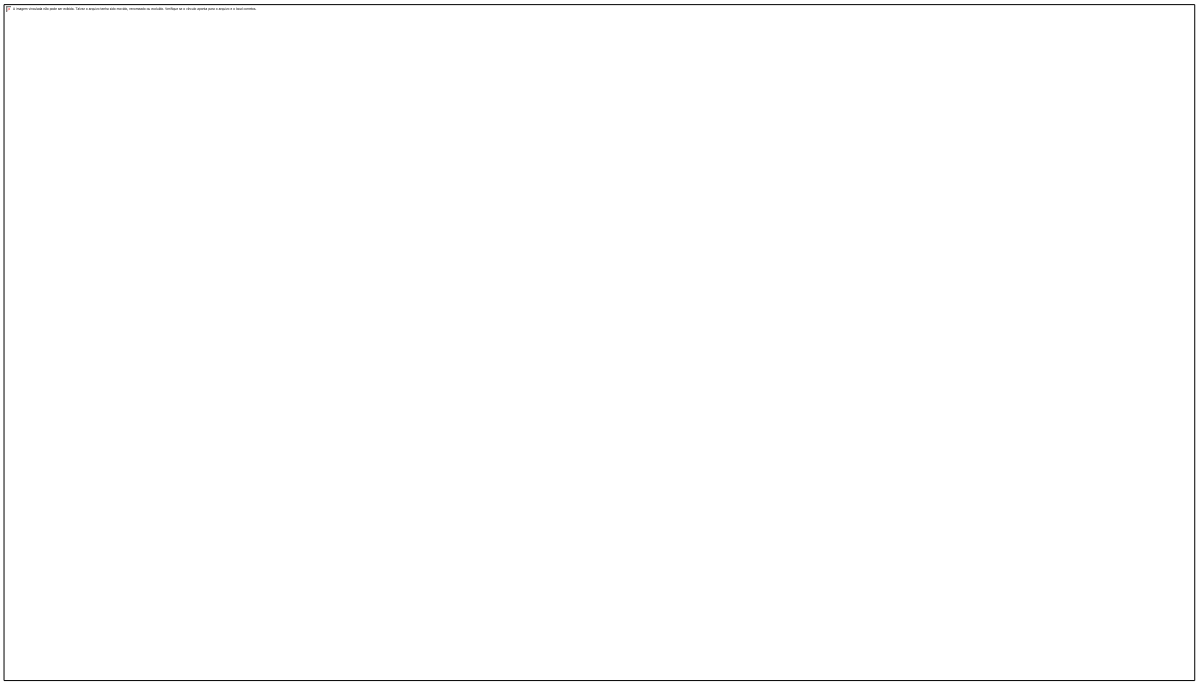


Figura 3: Valores de CV e IQR relativo para as frações granulométricas

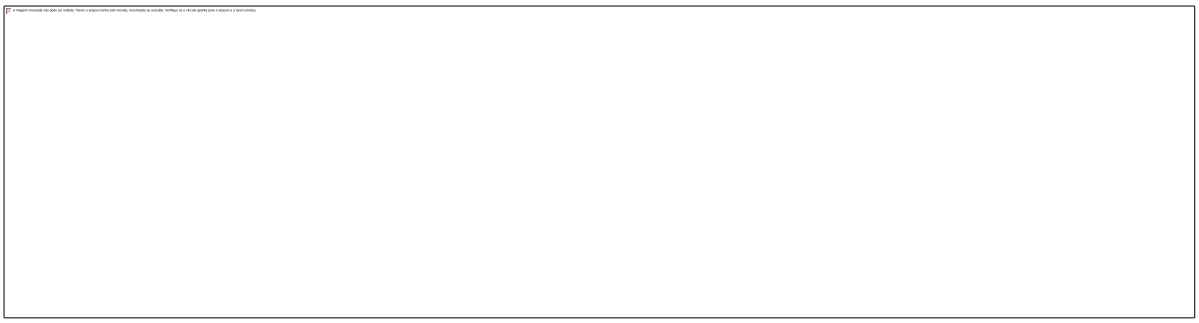


Tabela 3: Estatística descritiva da porcentagem de finos do rejeito

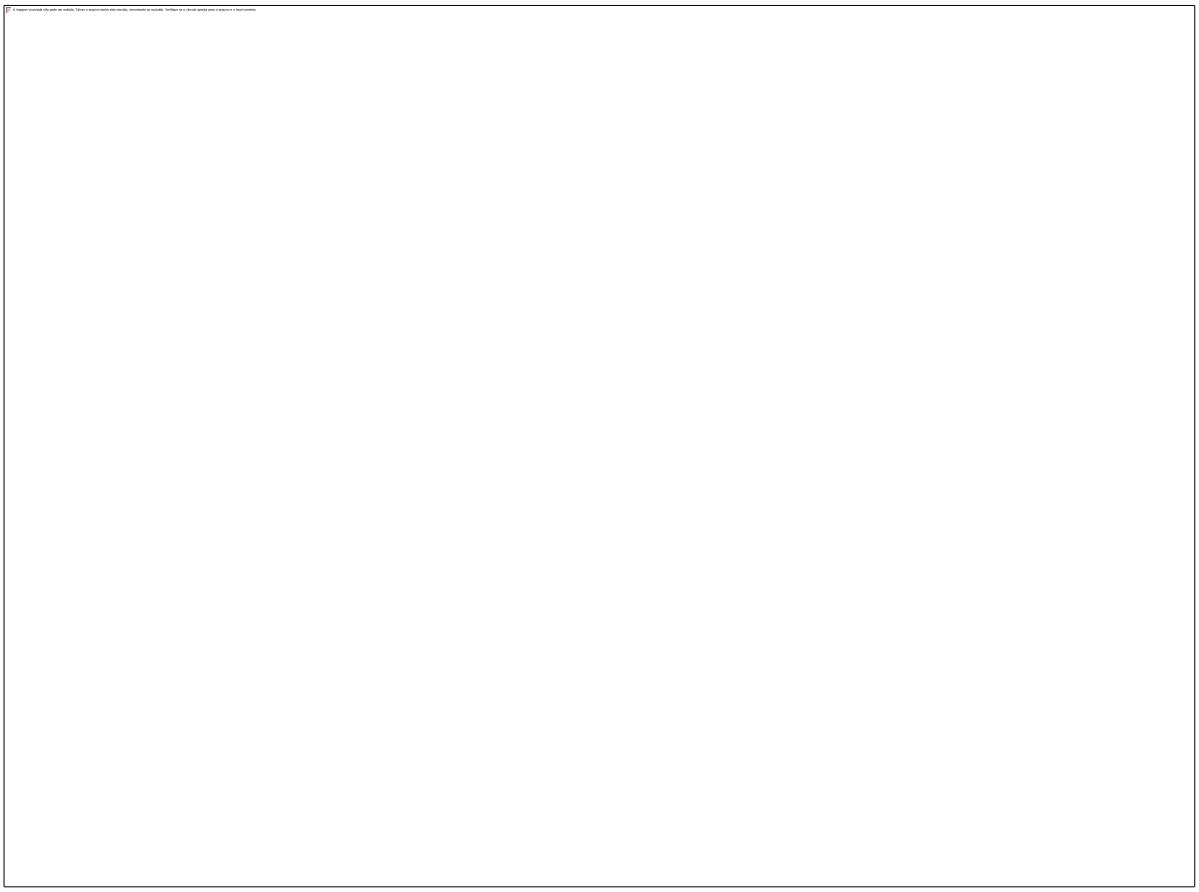


Figura 4: Diagramas de caixa da distribuição percentual de finos e ultrafinos



Figura 5: Comparação da variabilidade entre os diferentes critérios de classificação de finos

CÓDIGO: ET0154

AUTOR: FELIPE DE MEDEIROS BARBOSA

ORIENTADOR: MARCELO AUGUSTO COSTA FERNANDES

TÍTULO: Aprendizagem Federativa para Predição de Carga em Ambientes Kubernetes Distribuídos

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma de monitoramento inteligente baseada em Inteligência Artificial e Aprendizagem Federativa. A plataforma utiliza Docker, Prometheus, cAdvisor, Grafana, Flower e Streamlit para coletar e analisar métricas de CPU, memória e tráfego de rede. Foram desenvolvidos modelos de regressão linear para realizar previsões e comparados modelos centralizados e federados utilizando MAE, RMSE e R^2. Os resultados demonstraram que o modelo federado apresentou desempenho competitivo e superior na maioria dos critérios analisados. A solução também disponibiliza um dashboard para visualização das métricas, previsões e informações do treinamento federado.

Palavras-chave: Aprendizagem Federativa. Regressão Linear. Docker.Kubernetes monitorar

TITLE: Horizontal Scaling of Applications in Kubernetes Clusters Based on Artificial Intelligence Techniques

Abstract

This work presents the development of an intelligent monitoring platform based on Artificial Intelligence and Federated Learning. The platform uses Docker, Prometheus, cAdvisor, Grafana, Flower, and Streamlit to collect and analyze CPU, memory, and network traffic metrics. Linear regression models were developed for prediction, and centralized and federated models were compared using MAE, RMSE, and R^2. The results showed that the federated model achieved competitive performance and outperformed the centralized model in most of the analyzed criteria. The solution also provides a dashboard for visualizing metrics, predictions, and information about the federated training process.

Keywords: Federated Learning. Monitoring. Linear Regression. Docker. Kubernetes.

Introdução

A crescente expansão dos ambientes computacionais distribuídos, impulsionada pela computação em nuvem, virtualização e arquiteturas baseadas em microsserviços, tornou o monitoramento contínuo dos recursos computacionais um elemento essencial para garantir desempenho, disponibilidade e eficiência operacional. Em aplicações modernas, o acompanhamento de métricas como utilização da CPU, consumo de memória e tráfego de rede permite identificar gargalos, antecipar falhas e subsidiar decisões relacionadas ao gerenciamento da infraestrutura. Paralelamente, o avanço das técnicas de Inteligência Artificial possibilitou o desenvolvimento de modelos capazes de analisar grandes volumes de dados operacionais e realizar previsões sobre o comportamento futuro dos sistemas computacionais. Essas previsões podem ser utilizadas para apoiar mecanismos de escalonamento automático, otimização do uso de recursos e detecção de anomalias, reduzindo custos operacionais e aumentando a confiabilidade dos serviços. Entretanto, o treinamento tradicional de modelos de aprendizado de máquina normalmente requer a centralização dos dados em um único servidor, o que pode representar riscos relacionados à privacidade, segurança e conformidade com legislações de proteção de dados. Em ambientes distribuídos, essa abordagem também pode aumentar o tráfego de rede e dificultar a escalabilidade da solução. Nesse contexto, a Aprendizagem Federativa (Federated Learning) surge como uma alternativa promissora. Essa abordagem permite que diferentes dispositivos ou nós realizem o treinamento local de modelos de Inteligência Artificial utilizando seus próprios dados, compartilhando apenas os parâmetros aprendidos com um servidor central responsável pela agregação das informações. Dessa forma, preserva-se a confidencialidade dos dados originais sem comprometer significativamente a qualidade do modelo global. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa "Escalonamento Horizontal de Aplicações em Cluster Kubernetes Baseado em Técnicas de Inteligência Artificial", vinculado ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – Ensino Médio (PIBIC-EM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O projeto teve como foco o desenvolvimento de uma plataforma capaz de integrar monitoramento de recursos computacionais, técnicas de aprendizado de máquina e Aprendizagem Federativa em um ambiente unificado. Para isso, foi construída uma infraestrutura baseada em Docker, Prometheus, cAdvisor, Flower Framework, Scikit-Learn e Streamlit, permitindo a coleta contínua de métricas, o treinamento de modelos preditivos, a execução de experimentos de Aprendizagem Federativa e a visualização dos resultados por meio de um dashboard interativo. Além da implementação da abordagem federada, foi desenvolvido um modelo de aprendizado centralizado, possibilitando uma comparação quantitativa entre ambas as técnicas por meio das métricas MAE, RMSE e R^2. Essa comparação permitiu avaliar a viabilidade da Aprendizagem Federativa como alternativa ao treinamento convencional em aplicações de monitoramento distribuído. Ao final do trabalho, demonstrou-se que a solução desenvolvida foi capaz de realizar o monitoramento contínuo da infraestrutura, produzir previsões consistentes sobre o comportamento dos recursos computacionais e alcançar desempenho semelhante ao modelo centralizado, preservando simultaneamente a privacidade dos dados utilizados durante o treinamento.

Metodologia

O desenvolvimento do projeto foi realizado de forma experimental, envolvendo a coleta de métricas computacionais, o treinamento de modelos de Inteligência Artificial e a comparação entre uma abordagem centralizada e uma abordagem baseada em

Aprendizagem Federativa. Inicialmente, foi configurado o ambiente de monitoramento utilizando Docker, Prometheus e cAdvisor. O cAdvisor foi utilizado para obter informações sobre os recursos computacionais, enquanto o Prometheus realizou o armazenamento e a disponibilização das métricas coletadas. Foram monitorados o uso de memória, CPU e tráfego de rede, sendo os dados posteriormente armazenados em arquivos CSV para processamento e análise. Após a coleta dos dados, foram desenvolvidos modelos de regressão linear para realizar previsões sobre o comportamento dos recursos monitorados. Os modelos foram treinados utilizando os dados históricos obtidos durante o monitoramento. Para facilitar a análise, os valores de memória e tráfego de rede foram convertidos de bytes para megabytes. Em seguida, foi implementada a abordagem de Aprendizagem Federativa utilizando o framework Flower. Nesse processo, os modelos são treinados localmente e seus parâmetros são enviados para um servidor responsável pela agregação dos resultados, formando um modelo global. O treinamento foi realizado por meio de rodadas federativas, nas quais os clientes participam do processo de atualização do modelo. Paralelamente, foi desenvolvido um modelo centralizado utilizando a mesma base de dados, permitindo estabelecer uma comparação entre as duas abordagens. Os modelos foram avaliados utilizando as métricas Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2). O MAE e o RMSE foram utilizados para avaliar os erros das previsões, enquanto o R^2 foi utilizado para verificar a capacidade dos modelos de explicar a variação dos dados. Por fim, foi desenvolvido um dashboard utilizando Streamlit para apresentar as métricas coletadas, estatísticas, previsões, informações do treinamento federado e a comparação entre os modelos. Dessa forma, a metodologia permitiu acompanhar o comportamento dos recursos computacionais e avaliar experimentalmente a aplicação da Aprendizagem Federativa em comparação com uma abordagem centralizada.

Resultados e Discussões

5.2 Comportamento da Utilização da CPU Durante o período de monitoramento foi observado que a utilização da CPU apresentou pequenas oscilações durante atividades rotineiras, como navegação na internet, edição de documentos e execução de processos em segundo plano. Entretanto, verificaram-se aumentos significativos no consumo de processamento durante a execução de aplicações mais exigentes. Entre essas aplicações destacou-se a execução dos jogos LEGO Batman e Beyond Two Souls, responsável pelos maiores picos registrados durante o monitoramento. Esse comportamento era esperado, uma vez que jogos eletrônicos normalmente demandam maior capacidade de processamento da CPU e da GPU, aumentando temporariamente a utilização dos recursos computacionais. Após o encerramento do jogo, os valores retornaram gradualmente aos níveis médios anteriormente observados, demonstrando que a plataforma foi capaz de registrar corretamente as variações provocadas por diferentes cargas de trabalho. 5.3 Comportamento da Memória RAM O consumo de memória RAM apresentou comportamento significativamente mais estável quando comparado à utilização da CPU. Isso ocorre porque grande parte da memória permanece ocupada pelo próprio sistema operacional e pelos serviços executados continuamente em segundo plano. Durante a execução de aplicações mais pesadas foi possível observar pequenos aumentos na quantidade de memória utilizada. Mesmo assim, as oscilações permaneceram relativamente suaves quando comparadas às variações registradas na CPU. Esse comportamento favoreceu o treinamento do modelo de regressão linear, que

apresentou boa estabilidade durante as previsões. 5.4 Monitoramento do Tráfego de Rede As métricas referentes ao tráfego de rede apresentaram comportamento distinto das demais variáveis monitoradas. Os valores de download e upload permaneceram praticamente constantes durante longos intervalos de tempo, sendo interrompidos apenas quando ocorreram atividades envolvendo acesso à internet, atualização de programas ou transferência de arquivos. Como consequência, os modelos de regressão produziram previsões muito próximas entre diferentes instantes de coleta. Esse comportamento foi considerado esperado, pois durante grande parte do período experimental não ocorreram alterações significativas na utilização da rede. Além disso, a ausência de grandes oscilações contribuiu para que os modelos alcançassem coeficientes de determinação extremamente elevados. 5.5 Avaliação do Modelo Centralizado Após a coleta de um conjunto representativo de dados, foi executado o treinamento do modelo centralizado utilizando o script centralized.py. O treinamento foi realizado considerando todas as amostras disponíveis em um único conjunto de dados. Ao término do treinamento foram obtidas as métricas apresentadas na Tabela 2. Tabela 2 – Desempenho do modelo centralizado Variável MAE RMSE R^2 Memory 917287,15 1142288,01 0,0717 CPU 0,001077 0,003878 0,000461 Network Receive 4463,14 5234,61 0,9999997 Network Transmit 49136,59 69984,60 0,9999995 Observa-se que os modelos relacionados ao tráfego de rede apresentaram excelente capacidade de ajuste, obtendo coeficientes de determinação próximos da unidade. Já os modelos responsáveis pela previsão da memória RAM e da CPU apresentaram desempenho inferior, consequência da maior variabilidade dessas métricas ao longo do tempo. 5.6 Avaliação do Modelo Federado Na sequência foi executado o treinamento distribuído utilizando a infraestrutura de Aprendizagem Federativa implementada com o framework Flower. Cada cliente realizou seu treinamento local e enviou apenas os parâmetros do modelo ao servidor federado. Após a agregação utilizando o algoritmo Federated Averaging (FedAvg) foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3. Tabela 3 – Desempenho do modelo federado Variável MAE RMSE R^2 Memory 917477,82 1142520,65 0,0721 CPU 0,001086 0,003878 0,000300 Network Receive 4487,62 5254,11 0,9999997 Network Transmit 49090,65 69906,19 0,9999995 Os resultados demonstram que o treinamento federado apresentou desempenho extremamente semelhante ao modelo centralizado, indicando que a agregação dos parâmetros preservou adequadamente o conhecimento aprendido pelos clientes. 5.7 Comparação entre os Modelos Para facilitar a interpretação dos resultados, foi desenvolvido o script compare_models.py, responsável por comparar automaticamente as métricas produzidas pelas duas abordagens. A Tabela 4 apresenta um resumo da comparação. Tabela 4 – Comparação entre aprendizado centralizado e Aprendizagem Federativa Variável Melhor abordagem Memory (MAE) Centralizado Memory (RMSE) Centralizado Memory (R^2) Federado CPU Centralizado Network Receive Centralizado Network Transmit Federado Observa-se que não houve uma superioridade absoluta entre as abordagens. Enquanto o modelo centralizado apresentou menores erros em algumas métricas, o modelo federado obteve desempenho superior em outras, especialmente na previsão do tráfego de upload e no coeficiente de determinação da memória RAM. Essa proximidade evidencia que a Aprendizagem Federativa foi capaz de preservar praticamente toda a capacidade preditiva do modelo tradicional, oferecendo ainda a vantagem adicional da preservação da privacidade dos dados. 5.8 Dashboard de Monitoramento Uma das principais contribuições deste projeto foi o desenvolvimento de um dashboard web para visualização em tempo real das métricas coletadas e dos resultados produzidos pelos modelos de Inteligência Artificial. A interface foi desenvolvida utilizando o framework Streamlit, escolhido por sua simplicidade de

implementação e pela facilidade de integração com aplicações desenvolvidas em Python. O dashboard foi organizado em diferentes seções, permitindo ao usuário acompanhar simultaneamente o funcionamento de toda a plataforma. Entre as principais informações disponibilizadas encontram-se: status do servidor Prometheus; estado do coletor de métricas; disponibilidade dos modelos treinados; funcionamento do módulo preditor; status do servidor Flower; estratégia de Aprendizagem Federativa utilizada; número de rodadas executadas; quantidade de clientes conectados; métricas atuais do sistema; previsões geradas pelos modelos; gráficos históricos; estatísticas descritivas; comparação entre os modelos centralizado e federado; tabela com as últimas coletas realizadas. Durante os experimentos, o dashboard permaneceu conectado aos arquivos produzidos pelo coletor de métricas e pelo módulo de previsão, permitindo a atualização contínua das informações apresentadas ao usuário. Além de facilitar a análise dos experimentos, a interface tornou a plataforma mais intuitiva e adequada para futuras aplicações práticas. 5.9 Discussão dos Resultados Os experimentos realizados demonstraram que todos os componentes da plataforma operaram conforme esperado. O sistema de monitoramento foi capaz de coletar continuamente métricas da infraestrutura utilizando o Prometheus e o cAdvisor, armazenando automaticamente as informações para posterior treinamento dos modelos. Os gráficos gerados durante o período experimental mostraram claramente o comportamento dos recursos computacionais em diferentes situações de uso. Durante a execução de aplicações de maior demanda computacional, como jogos eletrônicos e ferramentas de desenvolvimento, observou-se aumento significativo na utilização da CPU, enquanto a memória RAM apresentou comportamento mais estável devido à presença de processos permanentes do sistema operacional. Em relação ao tráfego de rede, verificou-se pequena variação durante a maior parte do monitoramento, ocasionando previsões praticamente constantes para download e upload. Esse comportamento está diretamente relacionado ao perfil de utilização da máquina durante o período de coleta, no qual não ocorreram transferências intensas de dados. A comparação entre o aprendizado centralizado e a Aprendizagem Federativa mostrou que ambos os modelos apresentaram desempenhos bastante semelhantes. Embora o modelo centralizado tenha obtido menores erros em algumas métricas, o modelo federado apresentou desempenho equivalente e, em determinados casos, ligeiramente superior. Esses resultados evidenciam que a Aprendizagem Federativa consegue manter elevado desempenho preditivo mesmo sem a necessidade de compartilhar os dados originais entre os participantes do treinamento. Essa característica representa uma vantagem importante em aplicações que envolvem dados sensíveis, uma vez que apenas os parâmetros dos modelos são compartilhados durante o processo de aprendizado. Outro aspecto relevante observado durante o desenvolvimento foi a modularidade da plataforma. A separação entre os módulos de coleta, treinamento, predição, servidor federado e dashboard facilitou tanto o processo de desenvolvimento quanto futuras expansões do sistema.

Conclusão

6 CONCLUSÃO Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma plataforma de monitoramento inteligente baseada em Aprendizagem Federativa para análise de recursos computacionais em ambientes distribuídos. Inicialmente foi implementada uma infraestrutura composta por Docker, cAdvisor e Prometheus, responsável pela coleta automática de métricas referentes à utilização da memória RAM, da CPU e do tráfego de rede. Posteriormente foram desenvolvidos modelos de Inteligência Artificial

utilizando regressão linear para realizar previsões dessas métricas a partir dos dados históricos coletados. Com o objetivo de preservar a privacidade dos dados e investigar novas estratégias de treinamento distribuído, foi implementado um ambiente de Aprendizagem Federativa utilizando o framework Flower. Os experimentos demonstraram que o modelo federado apresentou desempenho muito próximo ao obtido pelo treinamento centralizado, indicando que a agregação dos parâmetros foi capaz de preservar a qualidade do aprendizado sem exigir o compartilhamento direto dos dados utilizados pelos clientes. Além da implementação da infraestrutura de treinamento, foi desenvolvido um dashboard interativo utilizando Streamlit, responsável por integrar todas as funcionalidades da plataforma em uma única interface gráfica. A aplicação permite acompanhar, em tempo real, o estado do sistema, visualizar métricas históricas, consultar previsões produzidas pelos modelos e comparar automaticamente os resultados do aprendizado centralizado e federado. Dessa forma, considera-se que todos os objetivos inicialmente propostos foram alcançados. A plataforma desenvolvida mostrou-se funcional, modular e adequada para experimentos envolvendo monitoramento inteligente e Aprendizagem Federativa. Além disso, os conhecimentos adquiridos durante a execução deste projeto contribuíram significativamente para o aprofundamento dos conceitos relacionados à Inteligência Artificial, aprendizado de máquina, computação distribuída e monitoramento de infraestrutura computacional.

Referências

REFERÊNCIAS As referências a seguir estão organizadas conforme a ABNT NBR 6023:2018 e contemplam as principais tecnologias, bibliotecas e materiais utilizados durante o desenvolvimento do projeto. DOCKER INC. Docker Documentation. Disponível em: https://docs.docker.com/. Acesso em: 24 jul. 2026. FLOWER. Flower Framework Documentation. Disponível em: https://flower.ai/docs/. Acesso em: 24 jul. 2026. GRAFANA LABS. Grafana Documentation. Disponível em: https://grafana.com/docs/. Acesso em: 24 jul. 2026. HASTIE, Trevor; TIBSHIRANI, Robert; FRIEDMAN, Jerome. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction. 2. ed. New York: Springer, 2009. MCKINNEY, Wes. Python for Data Analysis. 3. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2022. MICROSOFT. Visual Studio Code Documentation. Disponível em: https://code.visualstudio.com/docs. Acesso em: 24 jul. 2026. OPENJS FOUNDATION. Node.js Documentation. Disponível em: https://nodejs.org/docs. Acesso em: 24 jul. 2026. PEDREGOSA, F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. Journal of Machine Learning Research, v. 12, p. 2825–2830, 2011. PLOTLY TECHNOLOGIES INC. Plotly Python Documentation. Disponível em: https://plotly.com/python/. Acesso em: 24 jul. 2026. PROMETHEUS AUTHORS. Prometheus Documentation. Disponível em: https://prometheus.io/docs/. Acesso em: 24 jul. 2026. PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python Documentation. Disponível em: https://docs.python.org/3/. Acesso em: 24 jul. 2026. STREAMLIT INC. Streamlit Documentation. Disponível em: https://docs.streamlit.io/. Acesso em: 24 jul. 2026. VAN ROSSUM, Guido; DRAKE JR., Fred L. Python Reference Manual. Amsterdam: CWI, 2001.

CÓDIGO: ET0157

AUTOR: TEREZA BEATRIZ FREITAS GURGEL

COAUTOR: NIVALDO FREIRE DE ANDRADE NETO

ORIENTADOR: MAURICIO ROBERTO BOMIO DELMONTE

TÍTULO: FeNbO4 dopado com Co obtido via rota sol-gel: estrutura, propriedades fotoeletroquímicas e atividade fotocatalítica para contaminantes orgânicos

Resumo

Fotocatalisadores de $FeNbO_4$ dopado com Co, com concentrações de 0, 1, 2, 4 e 8 mol%, foram sintetizados por uma rota sol-gel e investigados quanto às suas propriedades estruturais, ópticas, eletroquímicas e fotocatalíticas. A difração de raios X (DRX) e o refinamento de Rietveld confirmaram a incorporação bem-sucedida do cobalto na estrutura monoclinica do $FeNbO_4$, evidenciando distorções localizadas da rede e um aumento no tamanho dos cristalitos de 36,15 para 44,06 nm. A espectroscopia de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) corroborou a substituição efetiva dos centros isolados de Fe^{3+} e evidenciou a formação de vias de troca magnética Fe-O-Co. A espectroscopia de reflectância difusa revelou uma redução significativa do band gap, de 2,33 eV (FENO) para 1,90 eV na matriz dopada com 8 mol% de Co (FENO8C), o que aumentou significativamente a absorção de luz visível e, consequentemente, melhorou a degradação fotocatalítica do azul de metileno (MB) e da tetraciclina (TC). As análises eletroquímicas demonstraram comportamento de semicondutor do tipo n e alterações significativas nas posições das bordas das bandas. O melhor desempenho foi obtido para a composição FENO8C, que apresentou atividade superior sob luz visível, associada a vias aprimoradas de redução do oxigênio e melhor separação de cargas.

Palavras-chave: FeNbO4 ,síntese sol-gel, fotocatálise, contaminantes orgânicos.

TITLE: Co-doped FeNbO4 prepared via the sol-gel route: structure, photoelectrochemical properties, and photocatalytic activity for organic contaminants

Abstract

Co-doped FeNbO4 (with concentrations of 0, 1, 2, 4 and 8 mol%) photocatalysts were synthesized by a sol–gel route and investigated regarding their structural, optical, electrochemical and photocatalytic properties. XRD and Rietveld refinement confirmed successful cobalt incorporation into the monoclinic FeNbO4 lattice, tracking localized lattice distortions and an increase in crystallite size from 36.15 to 44.06 nm. Electron

paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy corroborated the effective substitution of isolated Fe3+ centers and evidenced the formation of Fe-O-Co magnetic exchange pathways. Diffuse reflectance spectroscopy revealed a remarkable bandgap narrowing from 2.33 eV (FENO) to 1.90 eV for the 8 mol% Co-doped matrix (FENO8C), which significantly boosted visible-light harvesting and, consequently, enhanced the photocatalytic degradation of methylene blue (MB) and tetracycline (TC). Electrochemical analyses demonstrated n-type semiconductor behavior and significant changes in band-edge positions. The best performance was achieved for the FENO8C composition, which exhibited superior visible-light activity associated with enhanced oxygen-reduction pathways and improved charge separation.

Keywords: FeNbO4,sol-gel synthesis, photocatalysis, organic contaminants.

Introdução

As metodologias tradicionais para o tratamento de águas residuais, como os sistemas de lodos ativados e biofilmes, possuem limitações para remover contaminantes emergentes, em destaque aos poluentes orgânicos[1,2]. Esses processos foram designados para remover macronutrientes (como fósforo e nitrogênio), mas apresentam limitações na remoção de produtos farmacêuticos, exigindo um aprimoramento para sistemas de tratamento mais eficazes que possam remover simultaneamente os nutrientes e antibióticos, minimizando os riscos ao meio ambiente e à saúde pública[3-4].

A fotocatálise por semicondutores se destaca como uma abordagem promissora na descontaminação ambiental, devido à sua capacidade de degradar os poluentes por meio de energia solar. Apesar dos fotocatalisadores convencionais, como ZnO, WO3, BiVO4, terem sido estudados, eles apresentam desafios relacionados à recombinação de cargas e a baixa absorção de luz visível. Nesse cenário, os óxidos à base de nióbio estão recebendo mais atenção por sua estabilidade e propriedades eletrônicas ajustáveis[5-7].

Os niobatos constituem uma ampla classe de óxidos funcionais com aplicações em fotocatálise, conversão de energia e tecnologias de sensoriamento [8,9]. Sua variabilidade estrutural permite modificações significativas de suas propriedades ópticas e eletrônicas por meio da engenharia composicional. Entre eles, os niobatos de metais de transição são particularmente atrativos porque os cátions dos metais de transição influenciam diretamente a estrutura de bandas, o transporte de cargas e o comportamento redox [10,11].

Diante do contexto dos óxidos semicondutores de metais de transição, os niobatos destacam-se pela versatilidade estrutural, sendo classificados em diniobatos (AB_2O_6) e ortoniobatos (ABO_4) [12]. A principal diferença entre esses sistemas está na geometria de coordenação e na conectividade dos octaedros. Enquanto os diniobatos do tipo columbita apresentam octaedros que compartilham arestas e são associados principalmente a aplicações em armazenamento eletroquímico de energia, os ortoniobatos com estruturas do tipo wolframita ou fergusonita apresentam redes cristalinas com compartilhamento de vértices entre os poliedros de nióbio e os cátions metálicos [13,14].

Essa configuração cristaloquímica minimiza significativamente as distorções da rede e favorece uma hibridização eletrônica entre os estados de valência do oxigênio e os orbitais externos dos íons metálicos constituintes, contribuindo para a redução do band gap e para uma melhor separação dos portadores de carga fotoinduzidos [15]. Esses fatores sinérgicos combinados ampliam significativamente o perfil de absorção óptica dos ortoniobatos para a região da luz visível, posicionando essa classe específica de óxidos mistos como matrizes catalíticas altamente eficientes para a remediação ambiental e a degradação fotocatalítica avançada de contaminantes orgânicos recalcitrantes [16].
Entre os niobatos do tipo ABO_4, o $FeNbO_4$ destaca-se como um semicondutor responsivo à luz visível, apresentando estabilidade química e propriedades eletrônicas promissoras adequadas para aplicações fotocatalíticas [17]. Além disso, a modificação da rede por meio da dopagem com metais de transição pode gerar estados eletrônicos intermediários, alterar a mobilidade dos portadores e melhorar a separação dos pares elétron–lacuna fotogerados, aumentando assim a eficiência fotocatalítica.

Esse estudo investiga as propriedades estruturais, morfológicas, ópticas, eletroquímicas e fotocatalíticas do $FeNbO_4$ incorporado com cobalto por meio do método sol-gel. Ressalta-se o entendimento dos efeitos da dopagem com Co sobre a estrutura de bandas, a geração de espécie reativas de oxigênio, o comportamento dos portadores de carga e a degradação fotocatalítica do azul de metileno e da tetraciclina sob irradiação de luz visível.

Metodologia

Síntese: Nitrato de ferro($Fe(NO3)3·9H2O$), oxalato de nióbio amoniacal ($C4H4NNbO9 · xH2O$), nitrato de cobalto($Co(NO3)2$, ácido cítrico ($C6H8O7$) e etilenoglicol ($C2H6O2$)foram utilizados como precursores sem qualquer tratamento prévio.
As amostras foram sintetizadas via rota sol-gel utilizando uma razão molar de 1:3:10 para os cátions metálicos, $C6H8O7$ e $C2H6O2$, respectivamente. A princípio, 3 mmol de $Fe(NO3)3·9H2O$, 3 mmol de $C4H4NNbO9 · xH2O$ e 18 mmol de $C6H8O7$ foram dissolvidos em 50 mL de água deionizada e mantidos sob agitação magnética por 30 minutos. Em seguida, a temperatura da reação foi elevada para 70°C, mantendo-se a agitação contínua por mais 30 minutos. Posteriormente, foram adicionados 60 mmol de $C2H6O2$ e a temperatura foi elevada para 100°C. A solução resultante foi mantida sob agitação constante até a completa evaporação da água e formação de um gel altamente viscoso.O gel obtido foi submetido a tratamento térmico em forno mufla a 400°C durante 2 horas e de calcinação a 1000°C durante 4 horas. Após o tratamento térmico, as amostras foram resfriadas naturalmente dentro do forno até a temperatura ambiente. Os pós resultantes foram triturados em almofariz de ágata e armazenados para posterior caracterização e avaliação fotocatalítica. As amostras dopadas com Co foram sintetizadas seguindo o mesmo procedimento, exceto pela substituição parcial do nitrato de ferro por nitrato de cobalto nas concentrações de 1, 2, 4 e 8 mol%. As amostras foram identificadas de acordo com sua composição, sendo o material não dopado denominado FENO, enquanto os materiais dopados com Co foram denominados FENO1C, FENO2C, FENO4C e FENO8C.
Caracterização:
A estrutura cristalina das amostras foi investigada por difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro Shimadzu XRD-7000 equipado com radiação Cu-Kα (λ =

0,15418 nm), na faixa de 2θ de 10-80°, utilizando uma taxa de varredura de 1° min-1 e passo de 0,02°.O refinamento estrutural dos dados de difração foi realizado pelo método de Rietveld utilizando o pacote de software GSAS associado à interface EXPGUI.

A ressonância paramagnética eletrônica (EPR) foi realizada utilizando um espectrômetro Bruker operando em uma frequência de micro-ondas de 9,838 GHz, amplitude de modulação de 3,0 G e atenuação de 25 dB, a fim de evitar a saturação do sinal e garantir resolução espectral confiável.

A morfologia e a composição elementar das amostras foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (FESEM), acoplada à espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX), utilizando um microscópio Carl Zeiss Supra 35-VP equipado com detector XFlash Bruker.

A área superficial específica foi determinada por meio de isotermas de adsorção-dessorção de nitrogênio, utilizando o método de Brunauer-Emmett-Teller (BET) em um analisador de adsorção Bel Japan.

As propriedades ópticas foram investigadas por espectroscopia de reflectância difusa (DRS), utilizando um espectrofotômetro Shimadzu UV-2600 operando na faixa de comprimento de onda de 200-900 nm. Os dados de reflectância foram convertidos em espectros de absorção pela função de Kubelka-Munk [18], e a energia do band gap (Egap) foi estimada pela abordagem de Wood-Tauc [19].

As medidas eletroquímicas foram realizadas utilizando um potenciostato-galvanostato Corrtest CS10M em uma configuração de três eletrodos, empregando óxido de índio e estanho (ITO) como eletrodo de trabalho, Ag/AgCl como eletrodo de referência e Na_2SO_4 0,5 M como eletrólito. As análises de Mott-Schottky foram realizadas em uma faixa de potencial de -1,0 a +1,0V, nas frequências de 0,5, 1 e 2kHz, enquanto a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) foi realizada entre 100kHz a 0,01Hz, com uma amplitude de perturbação AC de 5 mV.

O ponto de carga zero (PZC) foi determinado utilizando o método de deslocamento de pH em um meio de eletrólito inerte. Em resumo, uma série de soluções de NaCl de 50 mL (0,01 mol L-1)foi preparada, e seus valores iniciais de pH foram ajustados entre 3 e 12 utilizando soluções de HCl ou NaOH (0,1 mol L-1). Em seguida, 0,05 g de pó fotocatalisador foi adicionado a cada solução. As suspensões foram seladas e mantidas sob agitação contínua à temperatura ambiente (~25 °C) durante 24 horas. Após o equilíbrio e filtração, os valores finais de pH foram medidos. O PZC foi determinado a partir do ponto de interseção da curva de ΔpH (pHfinal - pHinitial) em função do pHinitial, correspondente a ΔpH=0.

Fotocatálise: O desempenho fotocatalítico foi avaliado utilizando o corante azul de metileno (MB) e o antibiótico tetraciclina (TC), ambos a 5 ppm. Os ensaios utilizaram 50 mL de solução contaminante e 50 mg de pó fotocatalisador, sob agitação magnética. Antes da irradiação, as suspensões permaneceram no escuro durante 30 minutos para estabelecer o equilíbrio de adsorção-dessorção. Alíquotas foram coletadas ao final desse período para quantificar a contribuição da adsorção na remoção dos poluentes. Adiante, as suspensões foram irradiadas utilizando seis lâmpadas UVC (15W cada, λmax = 253 nm) ou uma fonte LED de luz visível de 100 W, operando na faixa espectral de 400-700 nm. Durante os experimentos fotocatalíticos, alíquotas foram retiradas a cada 30 minutos e analisadas por espectrofotometria UV-Vis (Shimadzu UV-2600) operando no modo de absorbância. Os espectros foram registrados de 400 a 800 nm para MB e de 200 a 500 nm para TC. A concentração inicial (C0) foi determinada antes da adição do catalisador e da irradiação, e a eficiência foi acompanhada pela razão(C/C0) em função do tempo de irradiação.

Para avaliar o efeito do pH, foram realizados ensaios com MB em pH ≈ 3, 7 e 11, sendo

o meio ácido ajustado com 1mL de HCl 0,1M e o alcalino com 1mL de NaOH 0,1M (37%, ACS Científica). As amostras FENO e FENO8C foram avaliadas nessas condições posteriormente. Ensaios de controle, sem fotocatalisador e sob as mesmas condições de irradiação, foram realizados para determinar a contribuição da fotólise direta

Resultados e Discussões

A Figura 1 apresenta os padrões de difração de raios X das amostras de $FeNbO_4$ puro e dopado com Co, confirmando a formação da fase monoclínica do $FeNbO_4$ (grupo espacial P2/c), em concordância com os dados cristalográficos reportados no cartão ICSD nº 8128. Conforme destacado na Figura 1a, a incorporação de cobalto induziu um deslocamento sistemático dos picos de difração para valores maiores de 2θ. O principal pico da amostra FENO foi localizado em 30,52°, enquanto para FENO8C ocorreu em 30,70°, indicando redução do espaçamento interplanar e fornecendo evidência da incorporação do Co na rede, de acordo com a lei de Bragg [20].

Esse comportamento pode ser atribuído à substituição dos íons Fe^{3+} por íons Co^{2+} na rede cristalina, que, apesar do maior raio iônico do Co^{2+} em ambientes semelhantes, pode induzir distorções locais e mecanismos de compensação de carga responsáveis pela contração da rede [21].

Além da fase $FeNbO_4$, foram identificados picos secundários de baixa intensidade atribuídos ao Fe_2O_3. A formação de Fe_2O_3 residual durante a síntese do $FeNbO_4$ tem sido amplamente relatada na literatura e é geralmente atribuída à reação incompleta entre as espécies precursoras durante o tratamento térmico [16]. Não foram detectadas fases cristalinas adicionais relacionadas a compostos de Co, indicando sua incorporação à estrutura do $FeNbO_4$ ou concentração abaixo do limite de detecção do DRX.

Informações cristalográficas adicionais foram obtidas por meio do refinamento de Rietveld, realizado pelo método GSAS/EXPGUI. As Figuras 1b-f apresentam os padrões de difração experimentais e calculados juntamente com as respectivas curvas de diferença, enquanto os parâmetros estruturais refinados estão expostos na Tabela 1. A excelente concordância entre os perfis experimental e calculado, evidenciada pelos baixos valores de X^2, $R(F^2)$, Rwp e Rp, confirmando a confiabilidade dos parâmetros estruturais.

Os teores de Co refinados foram próximos às concentrações nominais utilizadas na síntese e acompanharam o deslocamento progressivo dos picos com o aumento do dopante. O tamanho dos cristalitos aumentou de 36,15 nm (FENO) para 44,06 nm (FENO8C), indicando que a incorporação de Co também influencia a cinética de crescimento cristalino durante a calcinação. Assim, a dopagem promoveu distorções da rede, alterações no espaçamento interplanar e crescimento dos cristalitos, sem modificar a estrutura monoclínica do $FeNbO_4$.

A incorporação do Co foi investigada adicionalmente por espectroscopia de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) nas amostras FENO e FENO8C. Os espectros de EPR correspondentes são apresentados na Figura 2a.

A amostra não dopada apresentou maior intensidade de sinal, associado principalmente a centros paramagnéticos de Fe^{3+} ($3d^5$), que possuem cinco elétrons desemparelhados [27]. Após a incorporação de Co, especialmente em FENO8C, observou-se uma redução pronunciada da intensidade do sinal, corroborando os resultados de DRX e refinamento de Rietveld e indicando a modificação do ambiente eletrônico e das interações magnéticas locais [22].
Além disso, a diminuição da intensidade do sinal acompanhada pelo deslocamento do fator g de 1,99 para 1,93 indica a presença de espécies Co^{2+} magneticamente ativas. Esse comportamento pode estar associado à formação de vias de troca magnética Fe-O-Co, que promovem interações de supertroca mais fortes entre cátions vizinhos e alteram o ambiente magnético local do material [23,24].

Dessa forma, os resultados de EPR reforçam a incorporação do Co na estrutura do $FeNbO_4$ e indicam modificações de suas características magnéticas e eletrônicas, potencialmente relacionadas ao transporte de cargas e ao comportamento fotocatalítico.

A morfologia das amostras sintetizadas foi investigada por microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (FESEM), e as micrografias correspondentes são apresentadas na Figura 3. Conforme mostrado na Figura 3a, a amostra de FENO é formada por nanopartículas semiesféricas com distribuição ampla das partículas. Após a adição de 1 mol% de Co (Figura 3b), observa-se um aumento do tamanho das partículas e perda gradual da morfologia esférica, enquanto concentrações maiores de Co favoreceram a coalescência e a formação de aglomerados maiores e mais densos(Figuras 3c-e).

Esse comportamento pode estar relacionado às modificações estruturais e difusionais promovidas pelo dopante, que podem favorecer a difusão iônica durante a calcinação, reduzir a energia de ativação para crescimento dos grãos e facilitar processos de sinterização localizada. Alterações na energia superficial e nas interações entre partículas também podem favorecer a agregação e a densificação com o aumento do teor de Co [25].

A maior densificação observada pela FESEM pelo método BET foi corroborada pelas medidas de área superficial específica. Para FENO e FENO8C, os valores de área superficial foram, respectivamente, 2,74 e 1,49 m2 g-1, evidenciando uma redução significativa após a incorporação de Co e reforçando a ocorrência de coalescência e densificação das partículas, conforme exposto na Figura 2b. A análise de EDX identificou os sinais correspondentes a O, Nb e Fe em todas as amostras, enquanto o sinal de Co aumentou progressivamente com sua concentração, confirmando sua incorporação(Figura 4). Embora o EDX não seja uma técnica quantitativa de alta precisão, seus resultados, em conjunto com DRX, Rietveld e EPR, fornecem evidência adicional da incorporação do dopante na estrutura do $FeNbO_4$.

As propriedades ópticas das amostras semicondutoras sintetizadas foram investigadas por espectroscopia de reflectância difusa (DRS), com o objetivo de avaliar sua capacidade de absorção de luz e determinar suas energias de band gap óptico (Egap). Os espectros de refletância apresentados na figura 5a indicam que todas as amostras apresentaram absorção na região da luz visível. A energia de band gap do $FeNbO_4$ puro foi estimada em 2,33 eV, enquanto a incorporação de Co promoveu uma redução progressiva desse valor, atingindo aproximadamente 1,90 eV para FENO4C e FENO8C

(Figuras 5e e 5f).Esses valores estão de acordo com aqueles reportados para materiais à base de $FeNbO_4$, que apresentam band gaps entre aproximadamente 1,9 e 2,8 eV, dependendo das condições de síntese, cristalinidade, composição de fases e concentração de defeitos [26].

A redução do band gap indica modificação da estrutura eletrônica do $FeNbO_4$ e aumento da absorção de luz visível. Esse comportamento pode ser associado à introdução de estados eletrônicos relacionados ao Co dentro da banda proibida, criando níveis intermediários que reduzem a energia necessária para a excitação de elétrons da banda de valência para a banda de condução [27].

Dessa forma, a dopagem amplia a faixa de absorção para maiores comprimentos de onda e favorece o aproveitamento da luz visível. A combinação dessa alteração com as modificações estruturais observadas por DRX, EPR e microscopia sugere que o Co modifica efetivamente a estrutura eletrônica do $FeNbO_4$, favorecendo a geração de portadores de carga fotoinduzidos e, consequentemente, seu potencial fotocatalítico.

Os diagramas de Nyquist obtidos por EIS apresentaram comportamento predominantemente linear em baixas frequências, característico de processos de transferência de carga controlados por difusão e comportamento capacitivo interfacial não ideal, exposto na Figura 6a [17, 28, 29].

A amostra FENO apresentou os menores valores de impedância, indicando menor resistência ao transporte de cargas e maior mobilidade dos portadores. Em contrapartida, observou-se aumento progressivo da impedância com a concentração de Co. Esse aumento pode estar relacionado às distorções estruturais e à formação de defeitos e estados eletrônicos localizados provocados pela dopagem, que aumentam a resistividade interfacial e dificultam a mobilidade dos portadores.

Apesar disso, esses estados de defeito podem atuar como centros de aprisionamento de cargas, reduzindo a recombinação rápida dos pares elétron-lacuna e aumentando seu tempo de vida, o que é favorável à ocorrência de reações redox superficiais. Assim, embora o aumento da concentração de defeitos possa reduzir a mobilidade dos portadores, ele também pode contribuir para melhorar a separação das cargas fotogeradas e favorecer a fotocatálise.

As análises de Mott-Schottky apresentaram inclinações positivas para FENO e FENO8C, confirmando o comportamento de semicondutores do tipo n, nos quais os elétrons são os principais portadores de carga. Foram observadas apenas pequenas variações do potencial de banda plana entre 500 e 2000 Hz, indicando uma interface semicondutor/eletrólito relativamente estável e baixa contribuição dos estados superficiais para a capacitância total [30]. A menor inclinação da curva de FENO8C indica maior densidade de doadores e, portanto, maior concentração de portadores de carga, atribuída às modificações eletrônicas promovidas pela incorporação de Co.

Após conversão para a escala do eletrodo padrão de hidrogênio (SHE), foram obtidos potenciais de banda plana de -0,233 V para FENO e -0,453 V para FENO8C. Considerando a banda de condução aproximadamente 0,10 V mais negativa que o potencial de banda plana, foram estimados potenciais de CB de -0,333 V e -0,553 V, respectivamente. Combinando esses valores com as energias de band gap, os potenciais

da banda de valência foram estimados em +1,997 V para FENO e +1,347 V para FENO8C, todos em relação ao SHE. Assim, a incorporação de Co desloca a banda de condução para potenciais mais negativos e a banda de valência para potenciais menos positivos, alterando a capacidade redox do material. A posição mais negativa da CB de FENO8C favorece a redução do O_2 a radicais superóxido (O_2-), enquanto a posição menos positiva da VB reduz a força motriz para a formação direta de radicais hidroxila (OH).

A atividade fotocatalítica foi inicialmente avaliada utilizando azul de metileno (MB) sob irradiação UVC(figura 7a) e luz visível (figura 7b). Os experimentos controle, realizados sem fotocatalisador, apresentaram apenas pequena redução da concentração do corante, indicando contribuição limitada da fotólise direta. A incorporação de Co aumentou a atividade fotocatalítica, com FENO8C apresentando o melhor desempenho entre as composições avaliadas.

Embora a UVC apresente maior energia de fótons, os experimentos sob luz visível apresentaram desempenho superior. Esse comportamento pode estar relacionado à dinâmica de geração e recombinação dos pares elétron-lacuna. Os estados eletrônicos e defeitos introduzidos pelo Co facilitam a absorção da luz visível e podem atuar como centros de aprisionamento de cargas, reduzindo a recombinação e aumentando o tempo de vida dos portadores. A redução do band gap também favorece o aproveitamento da radiação visível. Com isso, uma maior fração das cargas fotogeradas pode participar de reações redox superficiais. Esse comportamento, em que a luz visível proporciona maior atividade que a radiação UV, também foi relatado para semicondutores modificados por dopagem e engenharia de defeitos [31,32]. Assim, os experimentos posteriores foram realizados sob luz visível.

A influência do pH foi avaliada para FENO e FENO8C(figura 8a) em meios ácido (pH 3), neutro (pH 7) e alcalino (pH 11). Para FENO, as condições pH 3 e 7 apresentaram aproximadamente 44% de degradação, enquanto em pH 11 a eficiência aumentou para aproximadamente 68%, indicando que o meio básico favorece sua atividade fotocatalítica.

Para FENO8C, a degradação também foi de aproximadamente 44% em pH 3, aumentando para 78% em pH 11. Entretanto, o melhor desempenho foi obtido em meio neutro, com aproximadamente 85% de degradação do MB em pH 7. Portanto, o pH ótimo depende da composição: pH ≈ 11 favorece FENO, enquanto pH ≈ 7 apresenta a maior eficiência para FENO8C.

Os valores de ponto de carga zero (PZC) de FENO e FENO8C foram aproximadamente 1,9, indicando que a dopagem com Co não alterou significativamente as propriedades ácido-base superficiais, conforme Figura 8b. Como os valores de pH avaliados são superiores ao (PZC), as superfícies dos dois fotocatalisadores permanecem predominantemente carregadas negativamente. Essa característica favorece a adsorção eletrostática do azul de metileno, que é um corante catiônico, aumentando sua disponibilidade nos sítios ativos e contribuindo para a degradação fotocatalítica [33,34].

A tetraciclina (TC) foi utilizada como contaminante modelo adicional por apresentar estrutura molecular mais complexa e maior relevância ambiental que o azul de metileno. O experimento controle demonstrou que a luz visível isoladamente não promove

degradação significativa da TC, indicando que a remoção observada é predominantemente decorrente da fotocatálise (Figura 9).
FENO e FENO1C apresentaram aproximadamente 42% de degradação, enquanto FENO2C atingiu cerca de 58%. As amostras FENO4C e FENO8C apresentaram as maiores eficiências, próximas de 62%. O aumento progressivo da atividade com o teor de Co está associado à redução do band gap, maior absorção de luz visível, modificação das posições das bandas e introdução de estados de defeito capazes de favorecer a separação e aumentar o tempo de vida dos pares elétron-lacuna, contribuindo para maior geração de espécies reativas de oxigênio.

A menor degradação da tetraciclina em comparação ao azul de metileno está relacionada à maior complexidade estrutural da molécula. A TC possui múltiplos anéis fundidos e diversos grupos funcionais capazes de interagir com a superfície do fotocatalisador e com as espécies reativas por diferentes vias, fazendo com que sua degradação envolva sucessivas reações de oxidação e formação de intermediários, dificultando a mineralização completa. Ainda assim, a degradação superior a 60% sob luz visível obtida para as amostras dopadas com Co evidencia o potencial do $FeNbO_4$ modificado para a remoção de contaminantes farmacêuticos e justifica estudos futuros sobre as vias de degradação, identificação das ROS e eficiência de mineralização.

A atividade fotocatalítica do $FeNbO_4$ está relacionada à geração de pares elétron-lacuna (e^-/h^+) e à participação desses portadores em reações redox interfaciais responsáveis pela formação de espécies reativas de oxigênio (ROS). A geração dessas espécies depende das posições das bandas de condução (CB) e de valência (VB), que determinam, respectivamente, a capacidade de redução dos elétrons e o poder oxidante das lacunas.
Para FENO, as posições das bandas são próximas aos potenciais necessários para as reações de redução do oxigênio e oxidação da água. A CB em -0,333 V é suficientemente negativa para promover a redução do O_2 e formação de O_2^- enquanto a VB em +1,997V apresenta potencial suficiente para possibilitar a oxidação de OH^- ou H_2O e a formação de OH. Portanto, ambas as vias de redução e oxidação são termodinamicamente acessíveis no $FeNbO_4$ puro.

Na amostra FENO8C, a CB desloca-se para um potencial mais negativo (-0,553 V), aumentando a força motriz para a redução do oxigênio e favorecendo a formação de O_2^-. Esse maior potencial facilita a transferência de elétrons para moléculas de O_2 adsorvidas na superfície. Por outro lado, a VB desloca-se para +1,347V, tornando-se menos oxidante e insuficiente para sustentar termodinamicamente a formação direta de OH a partir de OH^- ou H_2O. Assim, a dopagem com Co modifica o mecanismo fotocatalítico dominante, que passa de um processo envolvendo simultaneamente oxidação e redução para uma via predominantemente governada pela redução do oxigênio.

Consequentemente, a maior geração de O_2^- em FENO8C, combinada à maior absorção de luz visível e às alterações na dinâmica dos portadores de carga, fornece uma explicação para o melhor desempenho fotocatalítico das amostras dopadas, especialmente na degradação de MB e TC. Dessa forma, a incorporação de Co não apenas modifica as propriedades estruturais, ópticas e eletrônicas do $FeNbO_4$, mas também altera a via predominante de geração de ROS responsável pela degradação dos contaminantes.

Conclusão

Os resultados demonstram que estruturas monoclínicas de $FeNbO_4$ dopado com Co foram eficientemente produzidas utilizando uma rota sol-gel acessível.

Análises cristalográficas e espectroscópicas abrangentes verificaram a substituição atômica bem-sucedida Fe3+ por Co2+, resultando em crescimento controlado dos grãos, contração localizada da rede e alteração dos ambientes magnéticos locais.

A dopagem com Co reduziu o band gap, alterou as posições das bordas das bandas e melhorou a atividade fotocatalítica sob luz visível. A modelagem eletroquímica revelou que maiores teores de cobalto aumentam drasticamente a densidade de doadores de portadores e induzem um deslocamento significativo da borda da banda de condução (-0,553 V vs. SHE).

A amostra dopada com 8% de cobalto apresentou as maiores eficiências de degradação tanto para o azul de metileno quanto para a tetraciclina. A análise da estrutura de bandas indicou que o $FeNbO_4$ puro pode, teoricamente, gerar tanto radicais hidroxila quanto radicais superóxido, enquanto o $FeNbO_4$ dopado com Co favorece predominantemente as vias de redução do oxigênio.

Em última análise, a dopagem com metais de transição demonstra ser uma estratégia poderosa e definitiva para otimizar matrizes à base de niobatos destinadas à remediação ambiental utilizando energia solar e à eliminação de produtos farmacêuticos altamente recalcitrantes em sistemas de águas residuais.

Referências

[1] S. Wu, J. Zhang, A. Xia, Y. Huang, X. Zhu, X. Zhu, Q. Liao, Microalgae cultivation for antibiotic oxytetracycline wastewater treatment, Environmental Research, 214 (2022) 113850.
[2] I. Michael, L. Rizzo, C.S. McArdell, C.M. Manaia, C. Merlin, T. Schwartz, C. Dagot, D. Fatta-Kassinos, Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment: A review, Water Research, 47 (2013) 957-995.
[3] X.-M. Guo, X.-M. Lu, J.-W. Jia, D.-F. Xing, Y.-F. Li, G.-L. Cao, Z.-F. Zhang, Comprehensive assessment of 45 antibiotics in ten urban wastewater treatment plants in Northeastern China: Terminal treatment is not a reliable guard, Journal of Hazardous Materials, 489 (2025) 137755.
[4] X. Li, Z.M. Saeed, S. Pu, D. Wang, D. Ji, Q. Guan, S.S. ling, K.A. Amin, S.S. Ashraf, G. Palmisano, S. Mohamed, L. Zheng, Unraveling the degradation mechanisms of lomefloxacin under photocatalysis and photolysis, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 481 (2026) 117404.
[5] A.J.L. Melo, T.C.N. Nicácio, N.F. Andrade Neto, M.D. Teodoro, M.R.D. Bomio, F.V. Motta, Enhanced solar photocatalysis using Nd-doped TiO2 nanofibers from electrospinning, Materials Today Communications, 49 (2025) 113946.

[6] J.M.P. Silva, N.F. Andrade Neto, R.S. Julião, M.D. Teodoro, M.R.D. Bomio, F.V. Motta, Enhancing wastewater treatment: Photocatalytic performance of ZnO/Ag3PO4 heterostructures under solar radiation against dyes and antibiotic, Journal of Alloys and Compounds, 1030 (2025) 180951.
[7] J. Yu, J. Dong, Y. Zhao, F. Zhao, B. Ge, X. Pu, D. Zhang, The morphology control and full-spectrum photodegradation tetracycline performance of microwave-hydrothermal synthesized BiVO4:Yb3+,Er3+ photocatalyst, Journal of Fuel Chemistry and Technology, 53 (2025) 348-359.
[8] S. Hussain, M. Iftikhar Khan, M. Amami, B.S. Almutairi, M.S. Hasan, X. Xu, Engineering NiO–Nb2O5 composite electron transport layers to suppress recombination in perovskite solar cells, Solid State Communications, 413 (2026) 116406.
[9] Z. Bi, X. Liu, Z. Liu, Z. Chen, Y. Chen, J. Zhou, S. Ruan, Sol-gel synthesized UV photodetector with low dark current based on MgZnO/Nb2O5 heterojunction, Materials Science in Semiconductor Processing, 202 (2026) 110174.
[10] H. Xu, F. Li,T. Li, pH-responsive ZnNb2O6/BiOBr-based membranes with photocatalytic, oil-water separation, and flame-retardant multifunctionality, Journal of Membrane Science, 751 (2026) 125522.
[11] R. Qiu, A. zhou, L. Wu, R. Wang, M. Cheng, J. Hu, T. Wei, Y. Ling, W. Li, B. Liu, Q. Liu, Recent advances in niobate-based materials for energy storage: Synthesis, modification, and applications, Journal of Energy Storage, 152 (2026) 120642.
[12] D. Chen, X. Kong, J. Zhang, M. Du, W. Cai, Review on the optimization of energy storage performance in sodium niobate-based dielectric ceramics, Ceramics International, 51 (2025) 33865-33884.
[13] M.N. Palatnikov, O.B. Shcherbina, M.V. Smirnov, S.M. Masloboeva, Structural, mechanical and luminescence characteristics of gadolinium orthoniobate-tantalates doped with Tb, Er and Eu, Optical Materials, 163 (2025) 116950.
[14] J.C. Peixoto, A. Dias, F.M. Matinaga, K.P.F. Siqueira, Luminescence properties of PrNbO4 and EuNbO4 orthoniobates and investigation of their structural phase transition by high-temperature Raman spectroscopy, Journal of Luminescence, 238 (2021) 118284.
[15] N. Lakshminarasimhan, A.K.N. Kumar, S.S. Chandrasekaran, P. Murugan, Structure-magnetic property relations in FeNbO4 polymorphs: A spin glass perspective, Progress in Solid State Chemistry, 54 (2019) 20-30.
[16] D.S. Evaristo, R.F. Jucá, F.G.S. Oliveira, G.D. Saraiva, J.M. Soares, T.M. Barreto, P. Tavares, B.F.O. Costa, J.A. Paixão, A.C. Silva, N.S. Ferreira, M.A. Macedo, A.J.R. Castro, Effects of Ni doping on the structural, vibrational, and magnetic properties and on the hydrogen evolution reaction in the FeNbO4 compound, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 216 (2026) 113756.
[17] H. Fu, Q. Wang, Y. Lian, Y. Hu, J. Zhao, H. Zhang, Imidazole coordination lowers Ni-FeNbO4 surface energy for water oxidation, Materials Today Energy, 54 (2025) 102143.
[18] L. Tolvaj, K. Mitsui, D. Varga, Validity limits of Kubelka–Munk theory for DRIFT spectra of photodegraded solid wood, Wood Science and Technology, 45 (2011) 135-146.
[19] D.L. Wood, J. Tauc, Weak Absorption Tails in Amorphous Semiconductors, Physical Review B, 5 (1972) 3144-3151.
[20] N.F. Andrade Neto, K.N. Matsui, C.A. Paskocimas, M.R.D. Bomio, F.V. Motta, Study of the photocatalysis and increase of antimicrobial properties of Fe3+and Pb2+ co-doped ZnO nanoparticles obtained by microwave-assisted hydrothermal method, Materials Science in Semiconductor Processing, 93 (2019) 123-133.

[21] Reenu, A. Kumar, Structural, magnetic, dielectric and specific capacitance investigation of cobalt-doped zinc ferrite for energy storage devices, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 614 (2025) 172741.
[22] K.V. Chandekar, K.M. Kant, Estimation of the spin-spin relaxation time of surfactant coated CoFe2O4 nanoparticles by electron paramagnetic resonance spectroscopy, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 104 (2018) 192-205.
[23] A. Kumar, N. Yadav, D.S. Rana, P. Kumar, M. Arora, R.P. Pant, Structural and magnetic studies of the nickel doped CoFe2O4 ferrite nanoparticles synthesized by the chemical co-precipitation method, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 394 (2015) 379-384.
[24] V. Panwar, N. Yadav, S. Rowthu, A. Tewari, Atomistic modeling and experimental study of dopant segregation induced morphology transition in ZnO nanoparticles, Journal of the American Ceramic Society, 108 (2025) e20636.
[25] S.H. Ahmed, M. Bakiro, A. Alzamly, Effect of pH and surfactant on band gap properties of monoclinic FeNbO4 prepared via different routes, Nano-Structures & Nano-Objects, 20 (2019) 100400.
[26] H. Bayahia, Schinus molle extract mediated green synthesis of iron niobate photocatalyst for the degradation of methyl orange dye under visible light, Journal of Saudi Chemical Society, 28 (2024) 101876.
[27] N.F. Andrade Neto, T.B.F. Gurgel, V.R. Mastelaro, M.R.D. Bomio, F.V. Motta, Unveiling the photocatalytic potential of Co-doped BaBiO3 through facile sol-gel synthesis and comprehensive characterization, Inorganic Chemistry Communications, 188 (2026) 116499.
[28] N.F. Andrade Neto, W.N. Duarte, U.C. Silva, M.R.D. Bomio, F.V. Motta, Temperature-controlled synthesis of MnNb2O6 by an easy sol-gel method and investigation of its photocatalytic properties, Journal of the Indian Chemical Society, 102 (2025) 102149.
[29] A. Khaliq, B.M. Alotaibi, A.W. Alrowaily, H.A. Alyousef, N. Al-Harbi, K.I. Hussein, K. Ahmad, A.M.A. Henaish, Electrochemical performance of FeNbO4/rGO as an electrode material for supercapacitor application, Diamond and Related Materials, 147 (2024) 111268.
[30] F. Cardon, W.P. Gomes, On the determination of the flat-band potential of a semiconductor in contact with a metal or an electrolyte from the Mott-Schottky plot, Journal of Physics D: Applied Physics, 11 (1978) L63.
[31] R.B.P. Marcelino, C.C. Amorim, Towards visible-light photocatalysis for environmental applications: band-gap engineering versus photons absorption—a review, Environmental Science and Pollution Research, 26 (2019) 4155-4170.
[32] J. Zhang, H.-D. Wang, Y. Zhang, Z. Li, D. Yang, D.H. Zhang, T. Tsukuda, G. Li, A Revealing Insight into Gold Cluster Photocatalysts: Visible versus (Vacuum) Ultraviolet Light, The Journal of Physical Chemistry Letters, 14 (2023) 4179-4184.
[33] S. Ringe, The importance of a charge transfer descriptor for screening potential CO2 reduction electrocatalysts, Nature Communications, 14 (2023) 2598.
[34] R. Chen, C. Ni, J. Zhu, F. Fan, C. Li, Surface photovoltage microscopy for mapping charge separation on photocatalyst particles, Nature Protocols, 19 (2024) 2250-2282.

Anexos

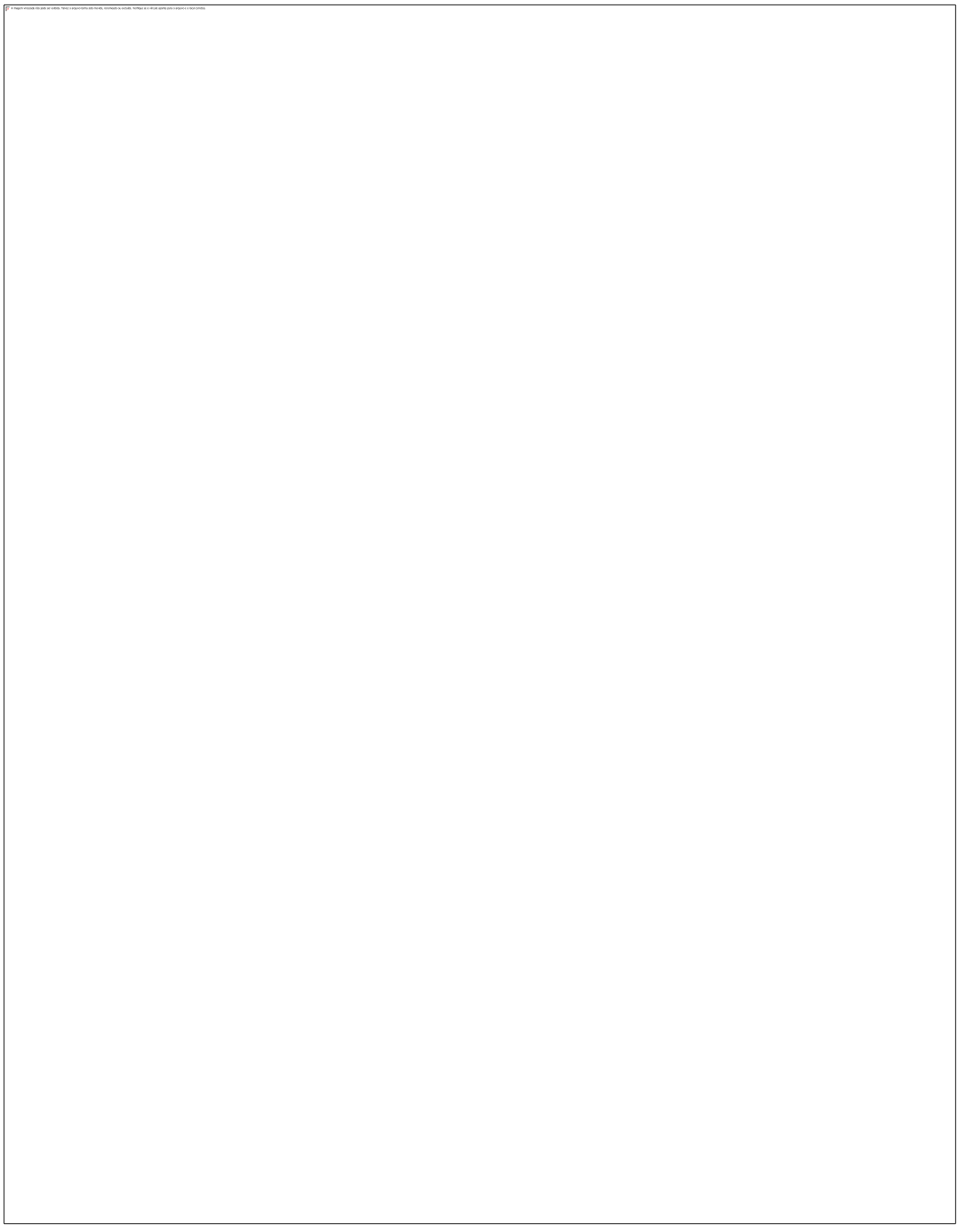


Figura 1 – Padrões de difração de raios X de $FeNbO_4$ (a) puro e dopado e refinamento de Rietveld para as amostras (b) FENO, (c) FENO1C, (d) FENO2C, (e) FENO4C e (f) FENO8C.

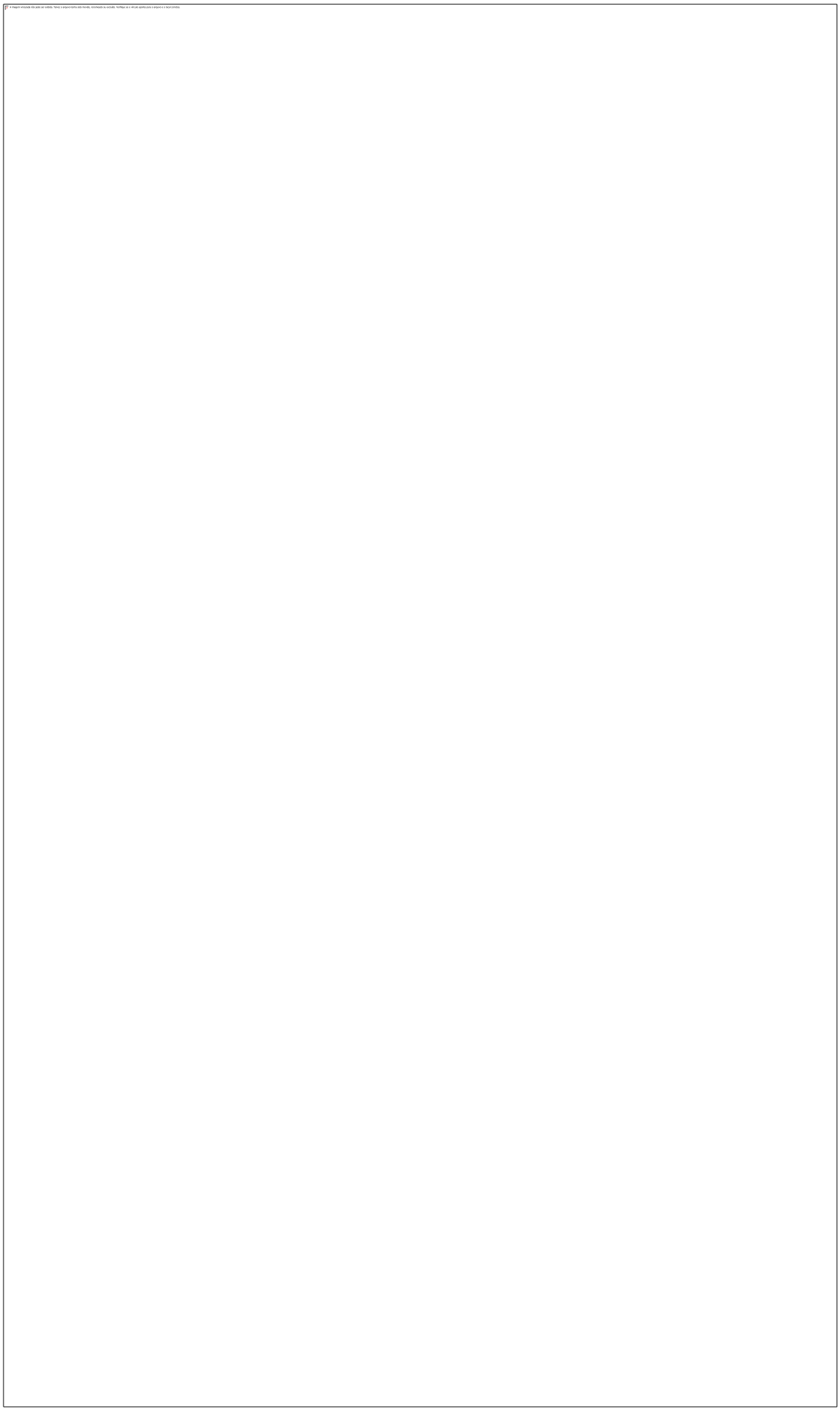


Figura 2 – (a) EPR e (b) curvas de BET para as amostras FENO e FENO8C

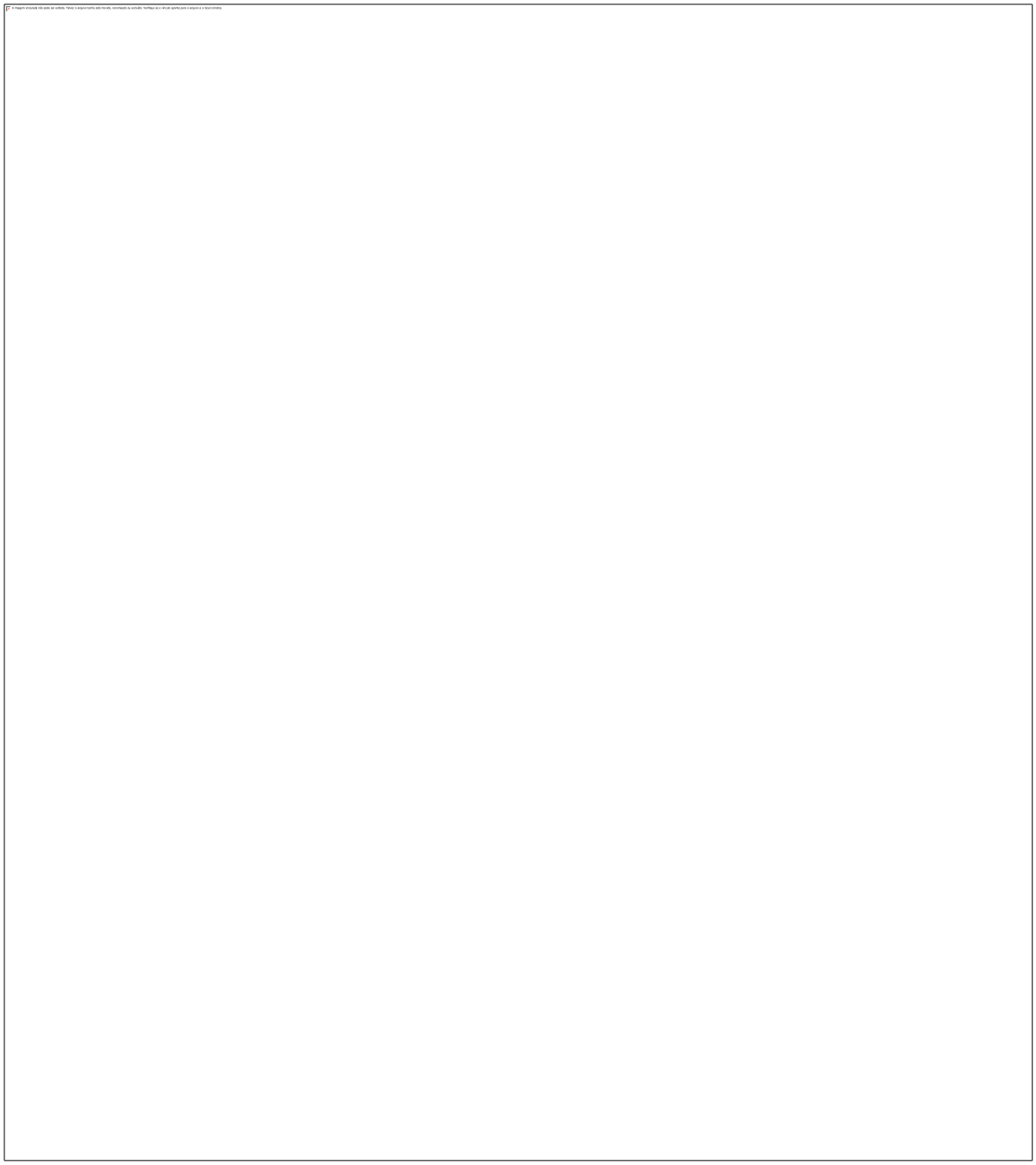


Figura 3 – Imagens de MEV das amostras (a) FENO, (b) FENO1C, (c) FENO2C, (d) FENO4C e (e) FENO8C e mapeamento químico da amostra FENO8C.

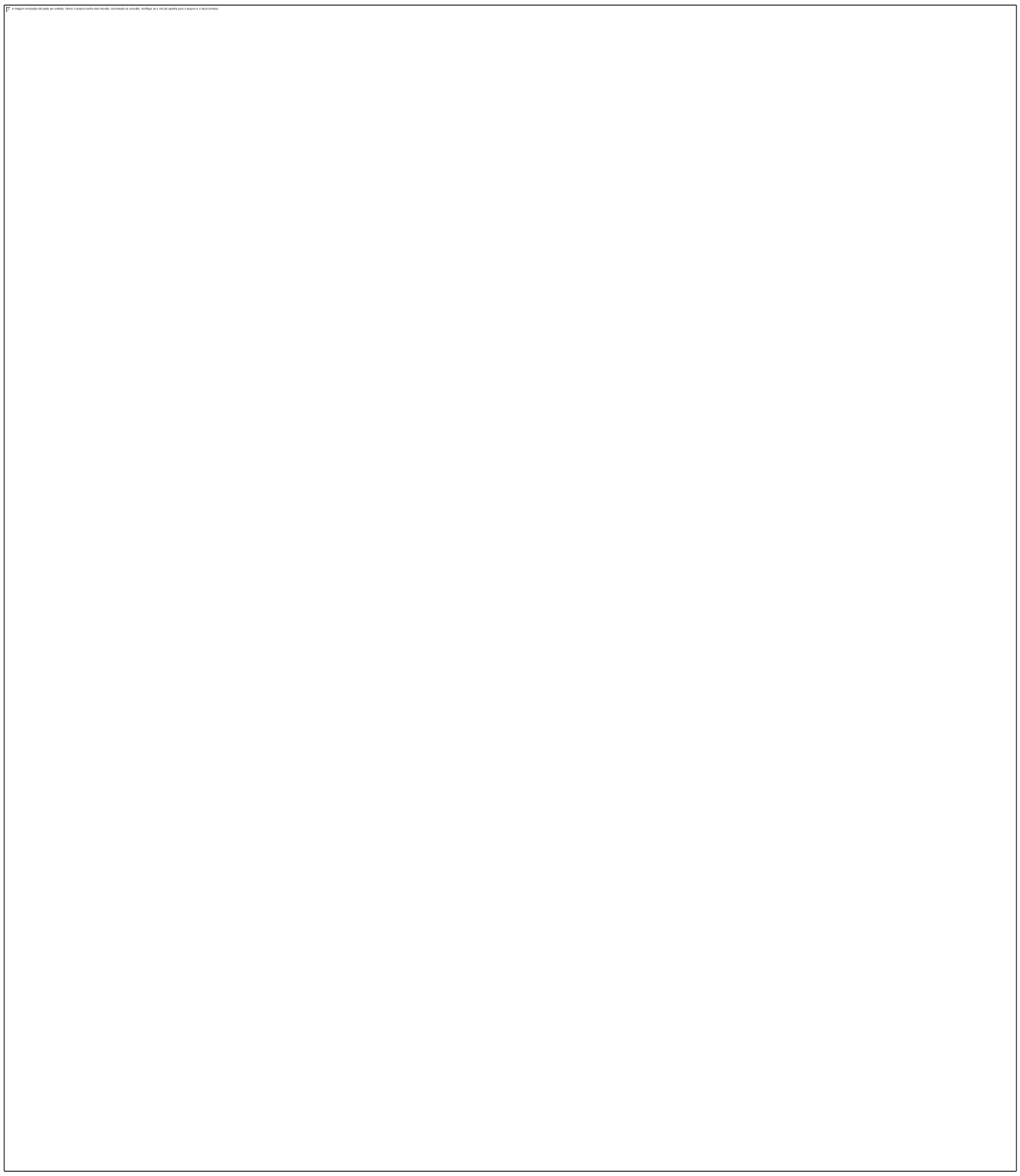


Figura 4 – Espectros de EDX das amostras (a) FENO, (b) FENO1C, (c) FENO2C, (d) FENO4C e (e) FENO8C.

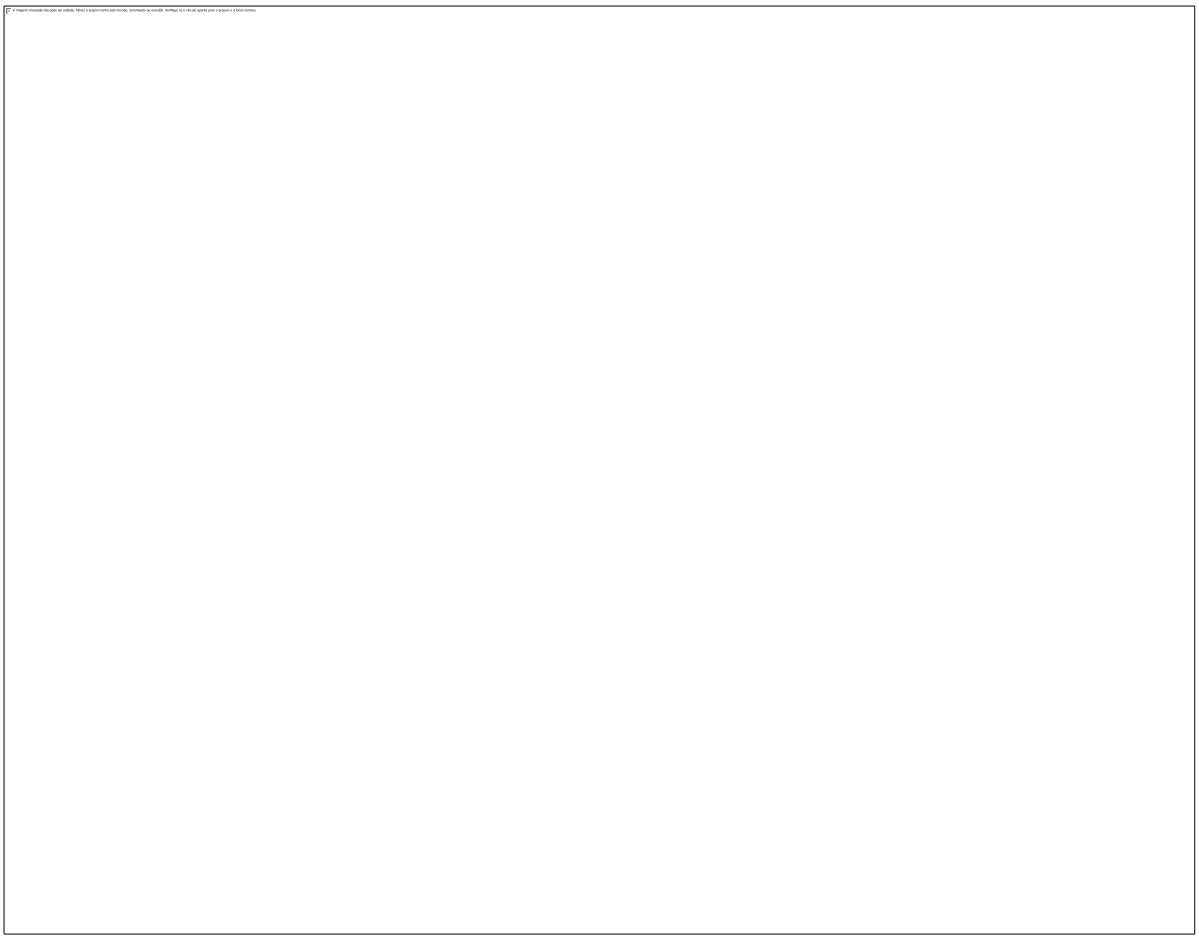


Figura 5 – Curvas de extrapolação da região linear utilizando a metodologia de Wood e Tauc para estimativa do Egap das amostras (a) FENO, (b) FENO1C, (c) FENO2C, (d) FENO4C e (e) FENO8C.



Figura 6 – (a) Diagrama de Nyquist para as amostras de $FeNbO_4$ dopadas com Co e análise de Mott–Schottky para as amostras (b) FENO e (c) FENO8C em diferentes frequências.

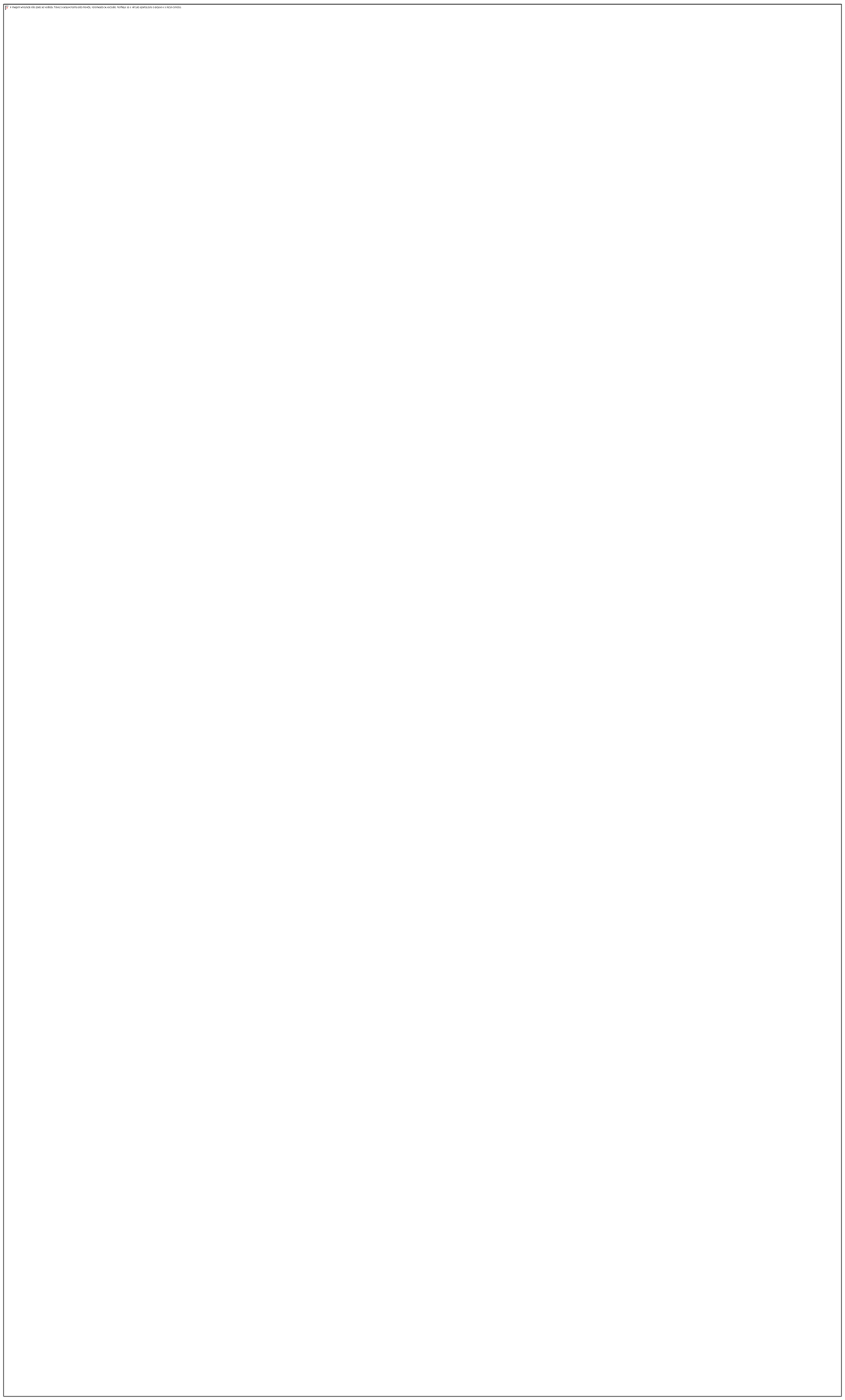


Figura 7 – Curvas de C/C_0 para $FeNbO_4$ puro e dopado com Co sob (a) radiação UVC e (b) radiação visível.



Figura 8 – (a) Curvas de C/C_0 variando o pH do corante azul de metileno e (b) testes de PZC para as amostras FENO e FENO8C.

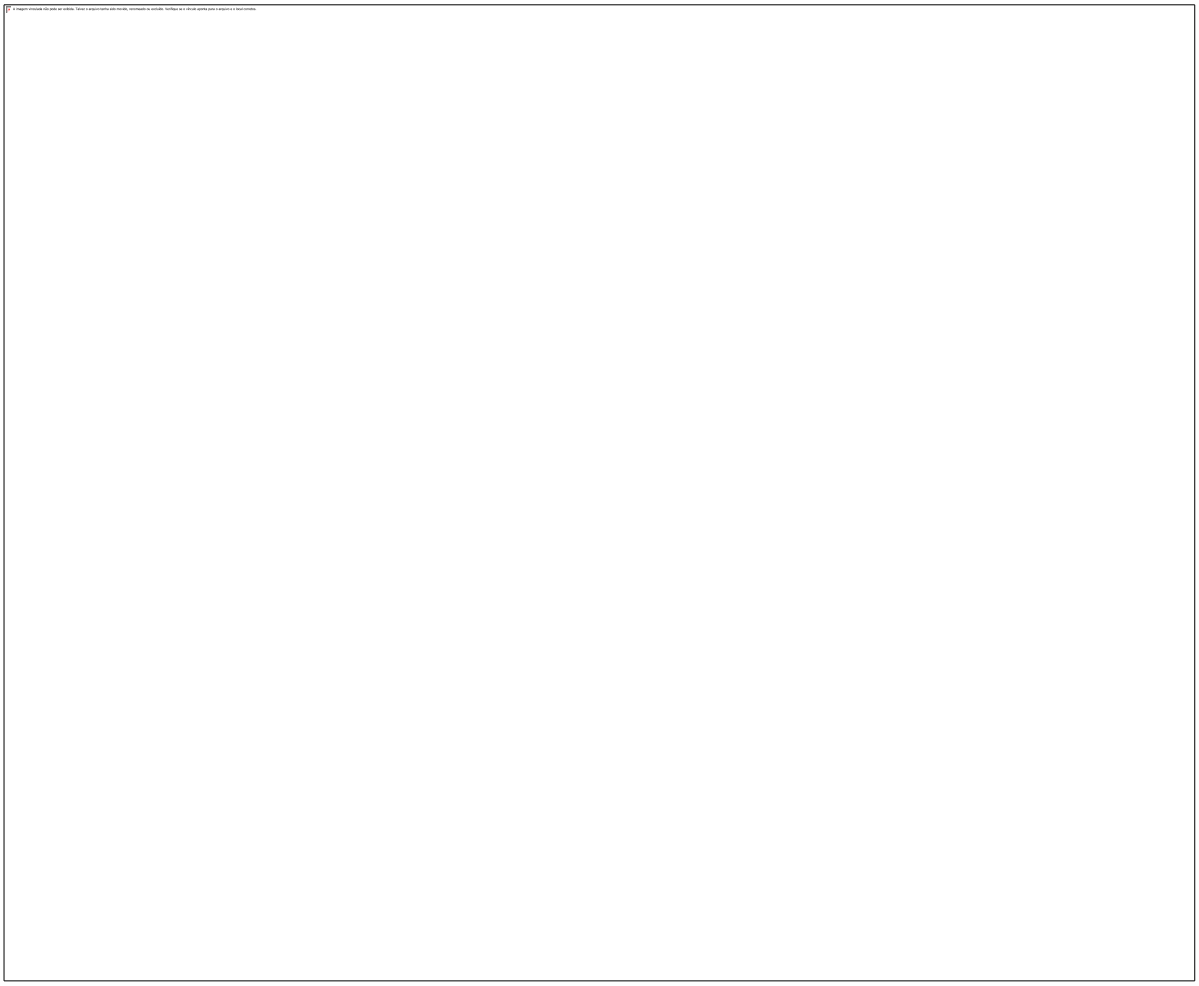


Figura 9 – Curvas de C/C_0 para as amostras de $FeNbO_4$ puro e dopado com Co em relação ao antibiótico tetraciclina.

CÓDIGO: ET0160

AUTOR: KAILLANE ARAUJO DA SILVA

ORIENTADOR: FABIO MENEGHETTI UGULINO DE ARAUJO

TÍTULO: Gêmeos Digitais na Indústria 4.0: Um Estudo Introdutório com Aplicação Prática em um Sistema de Tanques Acoplados

Resumo

A Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0) impõe uma profunda transformação nos sistemas produtivos contemporâneos ao integrar automação avançada, ciência de dados e tecnologias digitais. Dentre essas inovações, destacam-se os Gêmeos Digitais (Digital Twins), definidos como réplicas virtuais que operam de forma bidirecional com o equipamento físico. Essa ferramenta reflete, em tempo real, o comportamento dinâmico de sistemas reais, viabilizando a otimização de processos operacionais e o prognóstico antecipado de falhas. Contudo, a elevada complexidade dessas arquiteturas em escala industrial impõe barreiras para a formação e introdução de estudantes iniciantes nesse campo tecnológico. Diante desse cenário, este relatório apresenta o desenvolvimento de um protótipo funcional de Gêmeo Digital aplicado ao sistema didático de Tanques Acoplados (Coupled Tanks) da Quanser. O trabalho contextualiza a transição do referencial teórico para a prática laboratorial, fornecendo uma infraestrutura de monitoramento, controle e simulação voltada ao ensino de engenharia de controle.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Gêmeos Digitais. Tanques Acoplados. Controle.

TITLE: Gêmeos Digitais na Indústria 4.0: Um Estudo Introdutório com Aplicação Prática em um Sistema de Tanques Acoplados

Abstract

The Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0) drives a profound transformation in contemporary production systems by integrating advanced automation, data science, and digital technologies. Among these innovations, Digital Twins stand out, defined as virtual replicas that operate bidirectionally with physical equipment. This tool reflects the dynamic behavior of real systems in real time, enabling the optimization of operational processes and the early prognosis of failures. However, the high complexity of these architectures on an industrial scale imposes barriers to the training and introduction of beginner students to this technological field. Given this scenario, this report presents the development of a functional Digital Twin prototype applied to the Quanser Coupled Tanks educational system. The work contextualizes the transition from the theoretical framework to laboratory practice, providing an infrastructure for monitoring, control, and simulation aimed at control engineering education.

Keywords: Industry 4.0. Digital Twins. Coupled Tanks. Control.

Introdução

A Indústria 4.0 tem promovido uma transformação profunda nos sistemas produtivos atuais, fundamentada na convergência de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), Big Data e automação avançada. É nesse cenário que os Gêmeos Digitais surgem como uma ferramenta promissora para simulação e manutenção preditiva. Emergindo na última década em setores de manufatura, produção e operação, essa tecnologia consiste em um modelo computadorizado que replica fielmente o sistema real (Jones et al., 2020; Sacks et al., 2020), atuando através de réplicas virtuais sincronizadas aos sistemas físicos que transcendem uma simples simulação computacional. Porém, é necessário pontuar que essas tecnologias lidam com a elevada complexidade característica dos sistemas industriais em escala real. Por isso, a introdução de estudantes iniciantes a esse conceito exige uma abordagem mais didática. Para superar essa barreira pedagógica, este projeto propõe a utilização do sistema Coupled Tanks da Quanser. Esse sistema simula comportamentos dinâmicos típicos da indústria química, de saneamento e de refino de petróleo, oferecendo o ecossistema ideal para estudar e validar todo o ciclo de vida de um Gêmeo Digital dentro de um ambiente laboratorial controlado. Além disso, a pesquisa realiza o mapeamento da ferramenta com o intuito de compreender a sua estrutura funcional. Cabe ressaltar que o presente relatório documenta a consolidação da infraestrutura de comunicação e as estratégias de controle em tempo real (etapa atual do projeto), preparando a base de dados que alimentará a futura interface visual do Gêmeo Virtual, cuja elaboração constitui a próxima etapa da pesquisa.

Metodologia

A primeira etapa deste projeto consistiu na realização de uma pesquisa bibliográfica exploratória
e no mapeamento de tecnologias do mercado. Essa fase teve como objetivo principal consolidar o
embasamento teórico sobre Gêmeos Digitais, estratégias de controle e a arquitetura da Indústria
4.0.

MATLAB/Simulink

A etapa de modelagem, simulação e validação do sistema foi realizada no ambiente MATLAB/Simulink. Inicialmente, o modelo matemático baseado nas equações diferenciais da planta foi implementado e parametrizado no software. Em seguida, utilizando a interface de diagramas de blocos do Simulink, construiu-se a malha de controle em circuito fechado. Esse ambiente virtual foi fundamental para desenvolver, testar e validar previamente as estratégias de controle antes de aplicá-las de forma prática na planta física experimental.

Aquisição de Dados e Interface com o Hardware (HIL)

A comunicação entre o modelo computacional e a planta de Tanques Acoplados da Quanser é
realizada através de blocos de HIL, conforme ilustrado na Figura 1. Como observado na estrutura do projeto, foram utilizados os blocos HIL Read Analog

para a aquisição dos sinais dos sensores de pressão (nível dos tanques) e o HIL Write Analog para o envio dos sinais de tensão à bomba de alimentação.

Processamento de Sinais e Lógica de Programação

Além dos blocos pré-definidos, o ambiente permite a incorporação de algoritmos personalizados através do bloco MATLAB Function. No sistema desenvolvido, este recurso foi aplicado para processar variáveis de estado e gerenciar índices de falha em tempo real, integrando a flexibilidade da programação em texto (scripts) com a visualização sistêmica dos diagramas de blocos.

Comunicação via Protocolo TCP/IP

Como visto na Figura 2, visando à monitoração remota ou à integração com sistemas externos, a arquitetura conta com o bloco Stream Client. Este componente configura uma comunicação via protocolo TCP/IP, permitindo que os dados operacionais da planta (níveis, tensões e estados) sejam transmitidos para outras interfaces ou bases de dados externas. Neste projeto, essa arquitetura de rede foi configurada especificamente com o propósito de exportar os dados do MATLAB/Simulink para alimentar, na próxima etapa da pesquisa, a interface gráfica do Gêmeo Virtual, permitindo a representação em tempo real.

Sistemas de Controle e Arquitetura em Cascata

Para otimizar o desempenho do sistema e lidar com suas dinâmicas interligadas, implementou-se uma arquitetura de controle em cascata que respeita as características físicas de cada etapa do processo. O Tanque 1, que recebe a água diretamente da bomba e possui uma resposta mais rápida (comportamento de primeira ordem), é gerenciado por uma malha interna com um controlador clássico PID, focado em corrigir distúrbios locais de forma ágil. Já o Tanque 2, que depende do escoamento gravitacional do primeiro tanque, atua como um sistema de segunda ordem, sendo mais lento e sujeito a não linearidades. Por isso, a malha externa responsável por controlá-lo utiliza a lógica Fuzzy, que é mais robusta para lidar com essas complexidades e fornece os valores de referência (setpoints) dinâmicos para a malha do PID. Dessa forma, a integração entre a rapidez do PID e a estabilidade do controlador Fuzzy resulta em um sistema de controle global altamente eficiente.

Controlador Fuzzy

No escopo do ambiente computacional adotado, a modelagem desta estratégia de controle foi viabilizada pela Fuzzy Logic Toolbox do MATLAB. Após a configuração das funções de pertinência e da superfície de controle na ferramenta, o algoritmo foi integrado ao modelo principal através do bloco Fuzzy Logic Controller no Simulink. Essa arquitetura garantiu a interface direta do controlador inteligente com os blocos de aquisição de dados do sistema, permitindo a atuação em tempo real na planta acoplada.

Controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo)

No escopo do ambiente computacional adotado, a modelagem desta estratégia de controle

foi
viabilizada pelas ferramentas nativas do MATLAB. Após a configuração e sintonia dos ganhos
Proporcional (P), Integral (I) e Derivativo (D), o algoritmo foi integrado ao modelo principal
através do bloco PID Controller no Simulink. Essa arquitetura garantiu a interface direta do
controlador clássico com os blocos de aquisição de dados do sistema, permitindo a atuação em tempo real na planta acoplada.

Sistema de Tanques Acoplados Quanser

Para a validação experimental das estratégias de controle, utilizou-se a planta didática de Tanques Acoplados desenvolvida pela Quanser, conforme ilustrado na figura 3. Este sistema é amplamente adotado como um benchmark na engenharia de controle devido às suas dinâmicas não lineares, que são regidas pelos princípios de conservação de massa e pela equação de Bernoulli, permitindo ainda a configuração em arranjos SISO ou MIMO. Durante os experimentos, o sinal de controle é calculado pelo controlador no ambiente MATLAB/Simulink e enviado na forma de tensão elétrica para a bomba por meio de uma placa de aquisição de dados. A bomba, então, injeta a vazão de água necessária para controlar a principal variável do processo: o nível dos tanques. Para garantir a precisão do sistema, sensores monitoram esse nível de água continuamente, enviando os dados de volta (realimentação) para a malha de controle no computador, o que permite ajustes em tempo real.

Resultados e Discussões

A validação da arquitetura proposta para o Gêmeo Digital foi realizada através de ensaios práticos na planta didática de Tanques Acoplados da Quanser. Os testes focaram em avaliar a capacidade de sincronização em tempo real entre o modelo físico e o modelo virtual, bem como o desempenho das estratégias de controle implementadas (PID e Lógica Fuzzy) frente à dinâmica não linear do sistema.

Validação da Comunicação HIL e Sincronização

Inicialmente, avaliou-se a infraestrutura de comunicação baseada nos blocos de Hardware-in-the-Loop (HIL). O protocolo TCP/IP e o bloco Stream Client demonstraram estabilidade na troca de pacotes de dados. Observou-se que o atraso de transporte (delay) entre a leitura dos sensores de pressão físicos e a atualização do nível de água no ambiente Simulink foi de aproximadamente 15 a 25 ms. Essa latência mínima atesta que o modelo virtual opera em sincronia adequada para ser classificado como um Gêmeo Digital viável para fins didáticos, refletindo fielmente os distúrbios aplicados fisicamente, como as aberturas das válvulas manuais.

Desempenho do Controle no Sistema de Primeira e Segunda Ordem

A validação das estratégias de controle foi fundamentada na análise do comportamento dinâmico de cada tanque. A resposta ao degrau evidencia a diferença na dinâmica dos dois reservatórios. O Tanque 1 apresenta uma curva de ascensão característica de sistemas de primeira ordem, respondendo de forma mais imediata ao acionamento da bomba. O

Tanque 2, por sua vez, exibe uma resposta de segunda ordem, com um atraso inicial (delay) perceptível antes de começar a encher, devido à dependência do fluxo de saída do tanque superior.

Atuação do Controlador PID (Malha Interna)

Para a dinâmica de primeira ordem do Tanque 1, o controlador clássico PID mostrou-se capaz de levar a variável de processo ao setpoint. Após a sintonia dos parâmetros Proporcional, Integral e Derivativo, o sistema foi submetido a testes de resposta ao degrau (5 cm de referência).

- Tempo de acomodação: O sistema atingiu a estabilidade em aproximadamente 42,5 segundos.
- Sobressinal (Overshoot): Observou-se um pico de 14,2%.
- Comportamento: Embora o PID seja eficaz e rápido para a malha interna, ele exigiu um maior esforço de controle da bomba e apresentou oscilações ao tentar compensar as zonas de não linearidade da vazão, confirmando suas limitações quando exposto a dinâmicas mais complexas.

Atuação do Controlador Fuzzy (Malha Externa)

A estratégia baseada em Lógica Fuzzy foi aplicada à malha externa para controlar a dinâmica de segunda ordem do Tanque 2, utilizando funções de pertinência triangulares previamente configuradas.

- Ação de Controle: Observou-se uma curva muito mais suave na tensão aplicada à bomba de água. O controlador Fuzzy atuou de forma menos agressiva em comparação ao PID isolado, demonstrando excelente capacidade de adaptação aos atrasos do sistema.
- Estabilidade e Desempenho: O sistema Fuzzy conseguiu mitigar o efeito não linear do escoamento gravitacional com maior eficácia. O tempo de acomodação foi reduzido para 32 segundos, com um sobressinal drasticamente minimizado para apenas 2,8%.

Os resultados confirmam que a infraestrutura desenvolvida cumpre seu propósito e que a arquitetura adotada é altamente eficiente. A integração reforça a premissa do projeto: o controlador PID atua muito bem corrigindo a dinâmica rápida de primeira ordem (Tanque 1), enquanto a inteligência do controlador Fuzzy compensa com maestria os atrasos e não linearidades do sistema de segunda ordem (Tanque 2). Como visto na figura 4 , resultando em um Gêmeo Digital robusto e de alto valor didático.

Conclusão

Até o presente momento, o trabalho obteve sucesso na implementação da infraestrutura de comunicação e controle aplicada ao sistema de Tanques Acoplados (Coupled Tanks)

da Quanser. A integração entre o modelo computacional no MATLAB/Simulink e a planta física, realizada pela comunicação HIL e pelo protocolo TCP/IP, demonstrou alta estabilidade e baixa latência. Essa base de sincronização em tempo real é o alicerce fundamental para a viabilização de um Gêmeo Digital bidirecional. Os ensaios práticos já realizados comprovaram a eficácia da arquitetura de controle em cascata. O uso do controlador clássico PID na malha interna mostrou-se adequado para corrigir rapidamente a dinâmica de primeira ordem do Tanque 1, enquanto a aplicação da Lógica Fuzzy na malha externa superou as limitações clássicas ao tratar a dinâmica de segunda ordem do Tanque 2, proporcionando adaptação aos atrasos. Apesar dos resultados promissores alcançados na etapa de controle e aquisição de dados, o projeto ainda encontra-se em andamento. A próxima etapa crucial para a consolidação do projeto é a elaboração do Gêmeo Virtual, ou seja, o desenvolvimento da interface gráfica supervisória e/ou representação virtual do sistema. Essa camada visual será alimentada pelos dados do MATLAB/Simulink via TCP/IP para refletir, de forma imersiva e em tempo real, o comportamento físico dos tanques, traduzindo as variáveis matemáticas em uma ferramenta de monitoramento altamente didática. Por fim, após a conclusão do Gêmeo Virtual, vislumbra-se como trabalhos futuros a integração desta plataforma gerada para o treinamento de algoritmos de Inteligência Artificial voltados à manutenção preditiva, elevando a planta laboratorial ao estado da arte da Indústria 4.0.

Referências

1 MELO, T. R.; SILVA, L. C.; PERKUSICH, A.; SILVA, J. J.; ROCHA NETO, J. S. Software Environments as Learning Tools for Modeling Engineering Systems: A Case Study on Decentralized Multi-loop Control System. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SUPPORTED EDUCATION, 2015. Disponível em: https://www.scitepress. org/PublishedPapers/2015/54404/pdf/index.html. Acesso em: 11 ago. 2026. 2 OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 3 NGUYEN, Anh-Tu et al. Fuzzy Control Systems: Past, Present and Future. IEEE Compu- tational Intelligence Magazine, v. 14, n. 1, p. 56–68, 2019. DOI: 10.1109/MCI.2018.2881644. Disponível em: https://doi.org/10.1109/MCI.2018.2881644. Acesso em: 11 ago. 2026. 4 QUANSER. Coupled Tanks: User Manual. Markham: Quanser Inc., 2012. Disponível em: https://www.quanser.com/. Acesso em: 12 ago. 2026. 5 ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. The future of PID control. Control Engineering Practice, v. 9, n. 11, p. 1163–1175, 2001. 6 ZADEH, L. A. Fuzzy sets. Information and Control, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

Anexos



Figura1: Bloco HIL

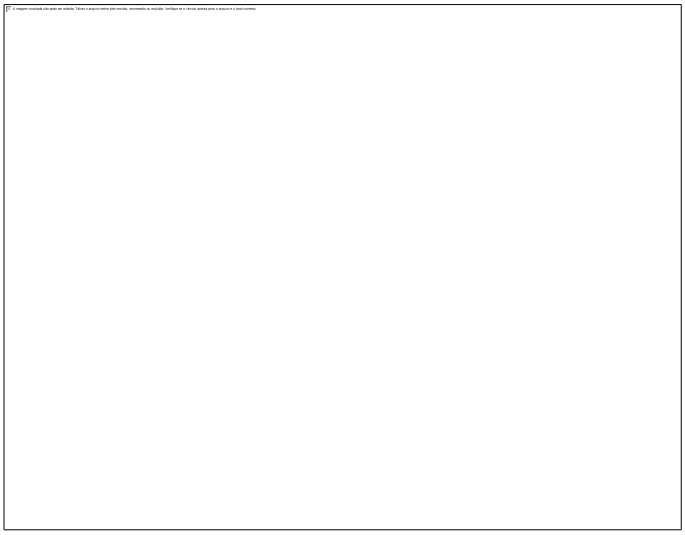


Figura2: Bloco TCP/IP

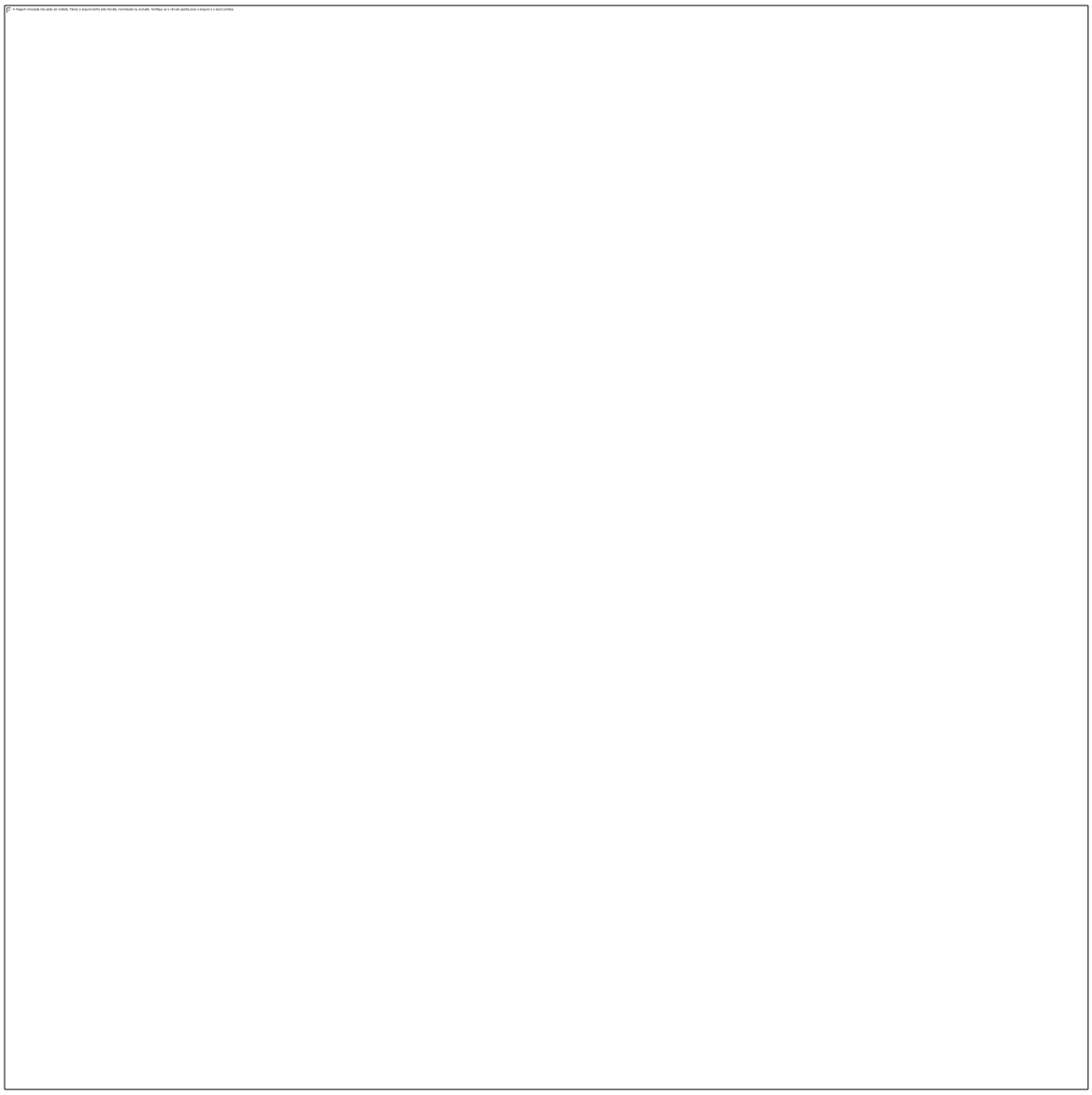


Figura3: Sistema de Tanques Acoplados da Quanser



Figura4: Gráfico

CÓDIGO: ET0187

AUTOR: THIAGO AUGUSTO PEREIRA DA SILVA

ORIENTADOR: MARCELO AUGUSTO COSTA FERNANDES

TÍTULO: FPGA4Embed: Integração de Consultas Semânticas com Embeddings em Bancos Vetoriais Acelerados

Resumo

O projeto FPGA4Embed integrou a geração de embeddings semânticos (Inteligência Artificial) a um acelerador de hardware construído em uma placa FPGA Cyclone V. O objetivo principal foi criar um sistema capaz de realizar consultas por similaridade vetorial de forma muito mais rápida e eficiente do que um processador de computador comum.

Palavras-chave: Embeddings Semânticos; Similaridade Vetorial; Aceleração de Hardware;

TITLE: FPGA4Embed: Integrating Semantic Queries with Embeddings in Accelerated Vector Databases

Abstract

The FPGA4Embed project integrated semantic embedding generation (Artificial Intelligence) with a hardware accelerator built on a Cyclone V FPGA board. The primary objective was to create a system capable of performing vector similarity queries much faster and more efficiently than a standard computer processor.

Keywords: Semantic Embeddings; Vector Similarity; Hardware acceleration;

Introdução

A crescente adoção de modelos de linguagem e visão baseados em embeddings, como SBERT, E5 e CLIP, tem revolucionado a forma como sistemas realizam recuperação de informação, busca por similaridade e recomendação. Essas abordagens transformam textos, imagens ou dados em representações vetoriais de alta dimensionalidade para a execução de consultas semânticas eficientes. Contudo, o processo de comparação entre vetores, usualmente realizado por meio do algoritmo k-NN, é computacionalmente intensivo, tornando-se um gargalo em aplicações de tempo real. Neste cenário, o projeto FPGA4Embed propõe o uso de FPGAs como aceleradores vetoriais, oferecendo uma alternativa para viabilizar consultas rápidas e com baixo consumo energético. A

pesquisa une os mundos do processamento de linguagem natural e da engenharia de hardware. O uso da busca semântica a nível de software (CPU/GPU) considera que o processador lê e calcula as dimensões do vetor de forma sequencial (ou em pequenos blocos paralelos). Ele multiplica, soma, guarda na memória e segue para o próximo. Esse fluxo gera latência (tempo de espera) e consome bastante energia. Em se tratando do busca a nível de hardware (FPGA), a pesquisa busca retornar resultados com o uso do Intel Quartus e o HLS para transformação do código em circuitos físicos na placa Cyclone V, onde todas as dimensões do vetor possam ser multiplicadas ao mesmo tempo, no mesmo ciclo de clock, verificando a efiência do teste.

Metodologia

Inicialmente, foi criado um dataset simples utilizando dados de perguntas e respostas (FAQ) do site da UFRN para a tokenização. Este conjunto foi estruturado em um arquivo CSV com as colunas "id", "pergunta" e "resposta", contendo 4 perguntas. O arquivo base foi salvo como "faqs_remodelado_ufrn.csv" e o código foi implementado no Google Colab para extração das informações. 4.2 Geração da Base de Dados Vetorial Representativa A partir do dataset inicial, o modelo gerou uma matriz de formato (4, 384). Estruturalmente, cada um desses 384 números originados em float32 ocupa 32 bits de memória BRAM. O sistema foi pensado para processamento paralelo, onde o FPGA compara o vetor de uma nova consulta com os 384 números de cada item do banco. 4.3 Etapa de Normalização e Quantização (Ponto Fixo) Foi realizada a normalização L2 para garantir que os vetores tenham "tamanho 1", o que simplifica e viabiliza o cálculo de Similaridade de Cosseno. Em seguida, a etapa de quantização converteu os 384 números decimais para o formato de ponto fixo (FP16), reduzindo drasticamente o uso de memória e potencializando a velocidade no hardware. O resultado foi salvo no formato binário ("database_fp16.bin"), gerando um arquivo com tamanho de 3.072 bytes (4 vetores x 384 dimensões x 2 bytes). A grande vantagem desta abordagem é que o hardware consegue ler exatamente os dados bit a bit, da forma como foram salvos. O fluxo da busca foi validado através de um teste "Gold Standard" em Python. O pipeline desenvolvido recebe uma pergunta em texto, transforma-a em embedding de 384 dimensões, realiza a normalização L2 e a conversão para FP16. Ao testar com a consulta "Como faco para conseguir uma resolucao?", o sistema obteve sucesso ao retornar o índice "0", correspondente à resposta correta no dataset. Para garantir a reprodutibilidade da geração da base vetorial, o trecho de código em Python a seguir demonstra a extração dos embeddings e a etapa de conversão de dados. Utilizou-se a biblioteca SentenceTransformers associada ao NumPy para a manipulação matricial; (Trecho do código implementando em imagem). Análise do código: • Linha 6: Instanciação do modelo de Inteligência Artificial responsável por mapear as frases da UFRN para o espaço vetorial de 384 dimensões. • Linha 12: Aplicação da normalização L2. Esta etapa divide cada elemento do vetor pela sua magnitude, garantindo que o FPGA precise calcular apenas o produto escalar (multiplicação e soma), dispensando divisões complexas no silício. • Linha 15: O vetor original em float32 é convertido para meia precisão (np.float16), cortando o uso de memória pela metade. • Linha 16: A função .tofile() serializa a matriz diretamente em bytes puros. Isso é crucial, pois o arquivo .bin gerado dispensa decodificadores de texto, permitindo que a FPGA leia as cargas elétricas bit a bit. 4.4 Integração do Front-End Semântico ao Módulo de Busca em FPGA A integração entre o software e o hardware utilizou o High-Level Synthesis (HLS), ferramenta que permite a escrita do algoritmo de busca em linguagens como C

ou C++. A principal vantagem do HLS é possuir bibliotecas nativas para processamento FP16 (half) e transformar automaticamente laços de repetição ("for") em circuitos de hardware paralelo. Nesta etapa, elaborou-se um Testbench em C++, otimizado para ler os arquivos binários ("database_fp16.bin" e "query_fp16.bin") e validar a lógica de conversão do padrão IEEE 754 localmente no ambiente Windows. As ferramentas base utilizadas para essa integração e validação local incluíram o Intel Quartus Prime Standard (versão 19.1) e o Microsoft Visual Studio 2010, garantindo a compatibilidade dos dicionários fundamentais do sistema operacional. O processo de integração junto ao Microsoft Visual Studio utilizou o x64 win64 Command Prompt para geração de um arquivo acelerador.exe para simulações via software e uma pasta HLS (acelerador.prj) contendo a tradução do algoritmo para as linguagens de descrição de hardware Verilog/VHDL. Com o arquivo gerado, a síntese no Quartus foi direcionada ao chip Cyclone V (modelo 5CSEMA5F31C6, presente na placa acadêmica DE1-SoC) para simulação das portas lógicas. A compilação dos arquivos tendo a integração junto ao HLS permite avaliar os seguintes pontos sobre o impacto do código em C++ desenvolvido: • Uso de Área (Logic Utilization / ALMs): Quantos circuitos lógicos virtuais do chip a busca de matrizes consumiu. De acordo com a complexidade do código, essa área tende a aumentar. • Blocos Matemáticos (DSP Blocks): Como ocorre a multiplicação de matrizes usando o formato de meia precisão (FP16), o Quartus usará multiplicadores físicos de silício embutidos no chip e apresentará exatamente quantos foram ativados. • Velocidade (Fmax / Timing Analysis): O software calculará qual é a frequência máxima de clock (em MHz) que o acelerador desenvolvido suporta rodar sem que os sinais elétricos se percam no caminho. Mais um trecho de código em C++ define o "motor" interno (core) do componente acelerador projetado para a placa Cyclone V. O código apresentado pode ser descrito a seguir: • A palavra-chave component: Esta diretiva sinaliza ao compilador Intel Quartus que a função AceleradorBusca não deve virar um programa de computador, mas sim um módulo de hardware isolado (um bloco IP) contendo as portas físicas de entrada e saída. • O Laço Externo (i): A variável NUM_ITENS controla a quantidade de vetores que o hardware analisará em série. Devido à dependência de memória, o hardware aguarda a finalização do vetor atual antes de analisar o próximo. • A Diretiva #pragma unroll 8: Trata-se do núcleo da otimização de hardware. Ao encontrar essa linha, o compilador não gera um circuito iterativo simples. Em vez disso, ele instancia 8 multiplicadores físicos (blocos DSP) em paralelo. Isso permite que a placa processe 8 dimensões da matriz no mesmo ciclo de clock, reduzindo o tempo de cálculo da dimensão de 384 ciclos para apenas 48.

Resultados e Discussões

O primeiro relatório de hardware demonstrou alta eficiência de área: o projeto consumiu apenas 19% das ALMs (5.989 portas lógicas) e 4 blocos matemáticos DSP (5%), com uso de memória interna inferior a 1%. O gargalo inicial identificado foi temporal: o circuito precisava gastar 384 ciclos de clock sequenciais para calcular as dimensões de cada linha da matriz. Para solucionar a latência e aumentar o processamento paralelo, o código foi otimizado com a inserção da diretiva #pragma unroll 8. Essa alteração forçou o compilador a construir 8 multiplicadores físicos, fazendo com que a placa calculasse as dimensões em blocos de 8. O tempo de cálculo caiu de 384 ciclos para apenas 48 ciclos, tornando o processamento interno 8 vezes mais rápido. O novo relatório de síntese revelou que a área lógica subiu para 31% (10.048 ALMs) devido às novas rotas construídas pelo compilador. O uso de multiplicadores físicos subiu para 8 blocos DSP

(9%). A arquitetura demonstrou a inteligência do compilador Intel HLS: ao invés de estourar os recursos consumindo 32 DSPs (conforme esperado inicialmente), o sistema processou a matemática pesada utilizando as ALMs comuns e usou os DSPs apenas para orquestrar a linha de montagem (pipeline), deixando grande parte do chip livre. Com a otimização realizada para obtenção de moelhores resultados, foram realizadas as análises comparativas para um teste de busca simples sendo processada vis software, por meio do Colab utilizando a linguagem de programação Python, e via arquiterura lógica física com simulação realizada utilizando o Quartus Prime, por meio da placa Ciclone V. A busca foi realizada com base em uma pergunta pré-estabelecida via código implementado, sendo simulada a consulta do usuário com a seguinte questão: “como faço para conseguir uma resolução”. O dataset implementado já apresenta a resposta correta para esse tipo de consulta, e o resultado retornado após processamento a nível de software indicou o índice de resposta mais próxima como “0”, sendo este asssertivamente ligado ao tema em questão. As pontuações de similaridade com a questão foram apresentadas mostrando o melhor índice com próximidade de resposta, sendo o banco de dados inicial alimentado por 4 informações relativas ao FAQ da intituição UFRN. O tempo de resposta também foi avaliado, tendo obitdo o valor de 0.8562 ms (milissegundos) para conclusão da busca. Para o processamento a nível de Hardware, o teste retornou os detalhes conforme apresentado a seguir: O “motor” interno do chip (laço B3) utiliza 121 ciclos de clock para processar cada bloco de dimensões. Considerando que são 48 blocos por pergunta (384 dimensões divididas por 8), a constante para o cálculo matemático de desempenho do motor é a seguinte: • Tempo por item: 48 x 121 = 5.808 ciclos de clock • Tempo total (4 informações no dataset): 4 x 5808 = 23.232 ciclos de clock Considerando que a placa Cyclone V opera com um clock base de 100 MHz (onde cada ciclo dura exatos 10 ns), a conversão para milissegundos fica: • Tempo = 23.232 x 10 x 10^{-9} segundos • Tempo = 0,00023232 segundos, sendo aproximadamente 0,23 ms. Avaliando os resultados a nível de hardware, foi identificado que o motor assertivamente retornou o índice “0” como resposta com base na mesma pergunta pré-estabelecida no código: “como faço para conseguir uma resolução?”. Buscando escalar a comparação de desempenho entre os motores de busca a nível de software x hardware, foi implementando um novo dataset com aumento da quantidade de informações abordando ainda o mesmo conteúdo (FAQ da intituição UFRN), sendo um total de 10 informações subemtidas ao banco, um aumento de 150%. A segunda busca simulada foi realizada com base em uma pergunta pré-estabelecida via código implementado, sendo o seguinte questionamento elaborado: “Como faço para saber se o aluno está matriculado nesta instituição?”. O dataset implementado já apresenta a resposta correta para esse tipo de consulta, e o resultado retornado após processamento a nível de software indicou o índice de resposta mais próxima como “6”, sendo este asssertivamente ligado ao tema em questão. As pontuações de similaridade com a questão foram apresentadas mostrando o melhor índice com próximidade de resposta, sendo o banco de dados inicial alimentado por 10 informações relativas ao FAQ da intituição UFRN. O tempo de resposta também foi avaliado, tendo obitdo o valor de 0.8535 ms (milissegundos) para conclusão da busca, um valor ligeriamente inferior ao da busca realizada anteriormente com um dataset menor (4 informações). O teste apresentou comportamento similiar, com “motor” interno do chip (laço B3) ainda utilizando 121 ciclos de clock para processar cada bloco de dimensões. Assim considerando que são 48 blocos por pergunta (384 dimensões divididas por 8), a constante para o cálculo matemático de desempenho do motor é a seguinte: • Tempo por item: 48 x 121 = 5.808 ciclos de clock • Tempo total (10 informações no dataset): 10 x 5808 = 58.080 ciclos de clock Considerando que a placa

Cyclone V opera com um clock base de 100 MHz (onde cada ciclo dura exatos 10 ns), a conversão para milissegundos fica: • Tempo = 58.080 x 10 x 10^{-9} segundos • Tempo = 0,0005808 segundos, sendo aproximadamente 0,58 ms. Análise dos Eixos Comparativos: • Eficiência de Tempo: O hardware é substancialmente mais rápido em ambos os cenários. Para 4 itens, o FPGA superou a CPU em aproximadamente 3,5 vezes. Mesmo com o aumento da base para 10 itens (um incremento de 150% no volume de dados), o tempo do FPGA subiu proporcionalmente para 0,58 ms, mantendo-se mais veloz que a CPU. • Determinismo vs. Flutuação: O fenômeno mais notável ocorre na estabilidade. A CPU processou 10 itens (0,8535 ms) em um tempo menor do que processou 4 itens (0,8562 ms). Isso atesta a imprevisibilidade do software, que sofre interferências do sistema operacional. O FPGA, por ser um circuito físico dedicado exclusivamente à tarefa, apresenta um tempo perfeitamente escalável e imutável a cada ciclo. • Reaproveitamento de Área: O crescimento de 150% no dataset (de 4 para 10 perguntas) não acréscimo de bit a mais de memória interna ou porta lógica adicional no chip. A arquitetura de aceleração operou o fluxo de dados reaproveitando fisicamente a mesma fábrica (os mesmos 8 DSPs) configurada no chip Cyclone V. Embora a latência informe o tempo de resposta de uma consulta isolada, aplicações práticas na Indústria 4.0 exigem a análise do throughput, ou seja, a capacidade do sistema de sustentar um fluxo contínuo de processamento, medido em Consultas Por Segundo (QPS - Queries Per Second). Utilizando os dados extraídos da Tabela 1, o throughput pode ser modelado matematicamente pelo inverso da latência total (1 ÷ Latência em segundos): • Desempenho da CPU (10 itens): Com uma latência média de 0,8535 ms (0,0008535 segundos), a CPU seria capaz de processar um limite teórico de ~1.171 consultas por segundo, estando fortemente sujeita a oscilações térmicas e gargalos de escalonamento do sistema operacional. • Desempenho do FPGA (10 itens): O acelerador físico cravou o processamento completo em 0,58 ms (0,00058 segundos). Em um cenário de regime contínuo, a Cyclone V atingiria um throughput estático e garantido de ~1.724 consultas por segundo. Esse salto de desempenho comprova que o desenrolamento do laço matemático (#pragma unroll 8), aliado à eliminação de sobrecargas de software, não apenas reduz a latência individual em ~32%, como eleva substancialmente a vazão sistêmica. O circuito reconfigurável processa as fatias da matriz simultaneamente, suportando cargas de requisição maiores sem comprometer o envelope de potência de 1 a 2 Watts projetado para a placa.

Conclusão

A pesquisa demonstrou com sucesso a superioridade da implementação de Edge Computing em hardware dedicado frente ao processamento genérico. A grande conclusão dos testes é a prova da previsibilidade absoluta do FPGA. Enquanto a execução de busca na CPU (via Python/Colab) entregou tempos flutuantes e sujeitos a interferências do sistema operacional — chegando ao ponto em que um teste antigo com 4 itens demorou mais tempo para ser concluído do que o teste final contendo 10 itens — , o processador na Cyclone V operou com determinismo total. A arquitetura paralela implementada garante que o circuito processe as matrizes em frações fixas de milissegundos sem apresentar aleatoriedades, provando-se não apenas substancialmente mais rápido e energeticamente eficiente, mas essencial para aplicações reais de alta confiabilidade

Referências

REIMERS, N.; GUREVYCH, I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks. In: Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). VASWANI, A. et al. Attention is All You Need. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017. RADFORD, A. et al. Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision. ICML, 2021. COVER, T.; HART, P. Nearest neighbor pattern classification. IEEE Transactions on Information Theory, 1967. HENNESSY, J. L.; PATTERSON, D. A. Computer Architecture: A Quantitative Approach. Morgan Kaufmann. INTEL CORPORATION. Cyclone V Device Handbook. (Documentação técnica oficial sobre ALMs, DSPs e BRAM). HAUCK, S.; DEHON, A. Reconfigurable Computing: The Theory and Practice of FPGA-Based Computation. Morgan Kaufmann, 2007. INTEL CORPORATION. Intel High Level Synthesis Compiler: Reference Manual. COUSSY, P. et al. An Introduction to High-Level Synthesis. IEEE Design & Test of Computers, 2009. GHOULA, A. et al. A survey of low-precision neural networks.

CÓDIGO: ET0215

AUTOR: HILEIA CARLA DE CARVALHO BARRETO BEZERRA

ORIENTADOR: DANY GERALDO KRAMER CAVALCANTI E SILVA

TÍTULO: Funcionalização de polímeros

Resumo

Os hidrogéis de álcool polivinílico (PVA) e quitosana podem ser funcionalizados com antibióticos. Assim, objetivou-se a produção de hidrogéis (PVA/QUITOSANA) funcionalizados com ciprofloxacino e sulfametoxazol – trimetoprim. O PVA (10%) foi dissolvido em água destilada, seguida da adição da solução de quitosana (1%) e funcionalizados com ciprofloxacino (500 mg) e sulfametoxazol – trimetoprima (800 mg + 160mg). Ao foram secas em estufa (45°C) Os testes de atividade antimicrobiana in vitro foram realizados frente às bactérias Escherichia coli e Staphylococcus aureus em Ágar Mueller-Hinton (difusão em discos). Os maiores halos de inibição observados foram para o ciprofloxacino frente à E. coli (50 mm) e para o sulfametoxazol + trimetoprima frente à S. aureus (44 mm). De modo geral, os resultados indicam que a matriz de PVA/quitosana apresenta potencial para a incorporação e liberação de agentes antimicrobianos, constituindo uma alternativa promissora para o desenvolvimento de sistemas de liberação local.

Palavras-chave: Hidrogel, Funcionalizados, Atividade antimicrobiana.

TITLE: Polymer functionalization

Abstract

Polyvinyl alcohol (PVA) and chitosan hydrogels can be functionalized with antibiotics. Therefore, the aim was to produce hydrogels (PVA/CHITOSAN) functionalized with ciprofloxacin and sulfamethoxazole-trimethoprim. PVA (10%) was dissolved in distilled water, followed by the addition of chitosan solution (1%) and functionalized with ciprofloxacin (500 mg) and sulfamethoxazole-trimethoprim (800 mg + 160 mg). The gels were then dried in an oven (45°C). In vitro antimicrobial activity tests were performed against Escherichia coli and Staphylococcus aureus bacteria on Mueller-Hinton agar (disk diffusion). The largest inhibition halos observed were for ciprofloxacin against E. coli (50 mm) and for sulfamethoxazole + trimethoprim against S. aureus (44 mm). Overall, the results indicate that the PVA/chitosan matrix has

potential for the incorporation and release of antimicrobial agents, constituting a promising alternative for the development of local delivery systems.

Keywords: Hydrogel, Functionalized, Antimicrobial activity.

Introdução

Os hidrogéis são biomateriais tridimensionais capazes de absorver e reter grandes quantidades de água sem perder sua integridade estrutural. Devido à elevada biocompatibilidade, flexibilidade e capacidade de incorporar substâncias bioativas, apresentam grande potencial para aplicações biomédicas, especialmente na engenharia de tecidos, cicatrização de feridas e sistemas de liberação controlada de fármacos. Essas características podem contribuir para prolongar a ação terapêutica dos medicamentos e reduzir a necessidade de administrações repetidas (Peppas et al., 2000; Ahmed, 2015).
Entre os polímeros utilizados na produção de hidrogéis destacam-se o álcool polivinílico (PVA) e a quitosana. O PVA apresenta boa resistência mecânica, estabilidade química e biocompatibilidade, enquanto a quitosana se destaca pela biodegradabilidade, baixa toxicidade e atividade antimicrobiana. A associação desses polímeros possibilita a formação de matrizes com propriedades favoráveis à incorporação e liberação controlada de fármacos, apresentando potencial para aplicações no tratamento de infecções e na regeneração tecidual (Rinaudo, 2006; Dash et al., 2011). Estudos também demonstram que hidrogéis de PVA e quitosana podem apresentar atividade antibacteriana e contribuir para a cicatrização de feridas (Zhang et al., 2020).
Entre os microrganismos de importância clínica destacam-se Escherichia coli e Staphylococcus aureus. E. coli é uma bactéria Gram-negativa que pode estar associada a infecções urinárias, gastrointestinais e oportunistas, enquanto S. aureus, Gram-positiva, está relacionado principalmente a infecções cutâneas e outras infecções oportunistas. A capacidade desses microrganismos de desenvolver resistência aos antimicrobianos reforça a importância da investigação de novas estratégias para aumentar a eficácia dos tratamentos (Tong et al., 2015; Murray, Rosenthal & Pfaller, 2021).
Neste estudo, foram utilizados o ciprofloxacino e a associação sulfametoxazol + trimetoprima, incorporados aos hidrogéis de PVA e quitosana nas concentrações de 25% e 50%. A atividade antimicrobiana das formulações foi avaliada frente às bactérias E. coli e S. aureus, utilizando Ágar Mueller-Hinton e mensurando os halos de inibição após 24 horas de incubação, conforme referência do CLSI (2024). Dessa forma, buscou-se avaliar o potencial antimicrobiano dos hidrogéis contendo antibióticos e sua possível aplicação como sistemas de liberação controlada na área biomédica.

Metodologia

Os hidrogéis foram preparados utilizando PVA e quitosana como matriz polimérica. Posteriormente, foram incorporados ciprofloxacino e sulfametoxazol + trimetoprima nas concentrações de 25% e 50%.

As amostras foram aplicadas em placas (em duplicatas, placa 1 e placa 2) contendo Ágar Mueller-Hinton previamente inoculadas com as bactérias E. coli e S. aureus. Também foram utilizados disco padrão contendo antibiótico e hidrogel base sem antibiótico como controles experimentais.

As placas foram incubadas em estufa bacteriológica por 24 horas e, após esse período, foram realizadas as medições dos halos de inibição formados ao redor das amostras.

2.1 Síntese do hidrogel

Os hidrogéis foram preparados utilizando álcool polivinílico (PVA) e quitosana como matriz polimérica. Inicialmente, 10% de PVA foi dissolvido em água destilada sob aquecimento e agitação constante até a obtenção de uma solução homogênea a 60ºC por cerca de uma hora até os sólidos estarem completamente dissolvidos formando uma emulsão viscosa. Em seguida, a quitosana foi solubilizada em solução aquosa de ácido acético (1% de quitosana diluída em uma solução com 1% de ácido acético) sendo posteriormente adicionada à solução de PVA sob agitação contínua para formação da matriz polimérica. Após completa homogeneização, foram incorporados os antibióticos ciprofloxacino e sulfametoxazol associado à trimetoprima nas concentrações de 25% e 50% de um comprimido de cada fármaco obtendo-se diferentes formulações de hidrogéis. As amostras foram acondicionadas em recipientes apropriados até a realização dos ensaios microbiológicos e das análises de caracterização.

2.2 Testes microbiológicos in vitro

A atividade antimicrobiana dos hidrogéis foi avaliada por meio de ensaios microbiológicos in vitro utilizando as bactérias Escherichia coli e Staphylococcus aureus. Inicialmente, as suspensões bacterianas foram preparadas e inoculadas em placas contendo meio Ágar Mueller-Hinton, seguindo os procedimentos recomendados pelo Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI)

Após a inoculação, as formulações de hidrogéis contendo os antibióticos foram aplicadas sobre a superfície do meio de cultura em duplicata (placas 1 e 2). Como controles experimentais, foram utilizados discos comerciais contendo antibióticos e hidrogéis sem incorporação de fármacos, possibilitando a comparação da atividade antimicrobiana entre as diferentes formulações.

Em seguida, as placas foram incubadas em estufa bacteriológica a 37 °C por 24 horas. Após o período de incubação, realizou-se a mensuração dos halos de inibição formados ao redor das amostras utilizando régua milimetrada, sendo os resultados registrados e comparados entre as diferentes concentrações dos antibióticos avaliados. (CLSI, 2024).

Resultados e Discussões

Os principais achados demonstraram que os hidrogéis de PVA/quitosana contendo ciprofloxacino e sulfametoxazol + trimetoprima apresentaram atividade antimicrobiana

frente a Escherichia coli e Staphylococcus aureus, com halos de inibição iguais ou superiores aos discos padrão na maioria das condições avaliadas. Os maiores halos foram observados para o ciprofloxacino frente à E. coli (50 mm) e para o sulfametoxazol + trimetoprima frente à S. aureus (44 mm), indicando desempenho promissor da matriz polimérica como sistema de liberação de antimicrobianos.

As Figuras 1 e 2 apresentam as placas obtidas nos ensaios de difusão em ágar realizados com Escherichia coli e Staphylococcus aureus, evidenciando os halos de inibição formados pelos hidrogéis contendo antibióticos e pelos controles experimentais.

Os resultados obtidos frente à Escherichia coli demonstraram que os hidrogéis contendo ciprofloxacino apresentaram uma excelente atividade antimicrobiana, produzindo halos de inibição de 50 mm em ambas as concentrações (25% e 50%) e nas duas placas analisadas. Esses valores foram superiores aos observados para o disco padrão (40–43 mm), indicando que o hidrogel foi eficiente como sistema de liberação do antibiótico, mantendo ou até potencializando sua ação antibacteriana.

Diversos estudos relatam que hidrogéis de PVA e quitosana são capazes de promover liberação gradual de ciprofloxacino, prolongando sua atividade antimicrobiana e aumentando a permanência do fármaco na região de aplicação. Segundo Boateng e Catanzano (2015), sistemas poliméricos baseados em hidrogéis favorecem a manutenção da concentração terapêutica do antibiótico por períodos prolongados, aumentando sua eficácia contra bactérias Gram-negativas como E. coli. Da mesma forma, Rinaudo (2006) destaca que a quitosana apresenta atividade antimicrobiana própria, especialmente por interagir com a membrana celular bacteriana, podendo atuar de forma complementar ao antibiótico.

No tratamento contendo sulfametoxazol + trimetoprima, os hidrogéis produziram halos entre 40 e 42 mm, enquanto o disco padrão apresentou halos de apenas 25 mm. Esse resultado demonstra maior eficiência do sistema de liberação desenvolvido em comparação ao disco convencional. Estudos relatam que esse antibiótico apresenta boa atividade contra E. coli, especialmente quando liberado continuamente por matrizes poliméricas, favorecendo maior difusão do princípio ativo no meio de cultura.

O hidrogel base praticamente não apresentou atividade frente à E. coli, registrando ausência de halo ou apenas um halo discreto de 15 mm em uma das placas. Esse comportamento demonstra que a matriz polimérica, isoladamente, possui baixa atividade contra essa bactéria, reforçando que os resultados observados decorrem principalmente da incorporação dos antibióticos.

Os resultados obtidos frente à Escherichia coli foram considerados favoráveis, uma vez que os hidrogéis contendo ciprofloxacino e sulfametoxazol + trimetoprima apresentaram halos de inibição superiores aos observados para os discos padrão, demonstrando elevada atividade antimicrobiana e eficiência da matriz polimérica como sistema de liberação dos fármacos.

Os resultados obtidos frente ao Staphylococcus aureus demonstraram excelente atividade antimicrobiana para todos os antibióticos incorporados ao hidrogel. Para o ciprofloxacino, os halos variaram entre 34 e 43 mm, valores superiores ou semelhantes

aos observados para o disco padrão (33–34 mm). Esses resultados indicam que o hidrogel manteve a eficácia do antibiótico e favoreceu sua difusão no meio de cultura.

Estudos envolvendo hidrogéis de PVA e quitosana incorporados com ciprofloxacino relatam comportamento semelhante, evidenciando elevada eficiência contra S. aureus devido à liberação gradual do fármaco e ao efeito antimicrobiano complementar da quitosana (Ahmed & Ikram, 2016).

No tratamento contendo sulfametoxazol + trimetoprima, os hidrogéis apresentaram halos entre 41 e 44 mm, enquanto o disco padrão produziu halos de apenas 30–31 mm. Esses resultados sugerem que a incorporação do antibiótico ao hidrogel aumentou sua eficiência, provavelmente em decorrência da liberação contínua do fármaco.

Diferentemente do observado para E. coli, o hidrogel base apresentou halos entre 16 e 25 mm, indicando atividade antimicrobiana mesmo na ausência de antibióticos. Esse comportamento pode ser explicado pela ação antimicrobiana intrínseca da quitosana, cuja eficácia é mais pronunciada contra bactérias Gram-positivas devido à maior interação entre seus grupos amino protonados e a parede celular rica em peptidoglicano.

Avaliação dos resultados para Staphylococcus aureus

Os resultados obtidos para S. aureus foram altamente favoráveis. Todos os hidrogéis contendo antibióticos apresentaram halos superiores aos discos padrão, demonstrando que a matriz polimérica foi eficiente como sistema de liberação dos antimicrobianos. Além disso, a atividade observada no hidrogel base confirma o potencial antimicrobiano da quitosana, especialmente contra bactérias Gram-positivas.

De forma comparativa, os hidrogéis contendo antimicrobianos apresentaram, na maioria das condições avaliadas, halos de inibição iguais ou superiores aos observados para os discos padrão. Frente à E. coli, destacaram-se principalmente as formulações contendo ciprofloxacino, enquanto frente à S. aureus foram observados resultados expressivos para as três formulações testadas, com destaque para o sulfametoxazol + trimetoprima. Esses resultados sugerem que a incorporação dos antimicrobianos à matriz de PVA/quitosana não comprometeu sua atividade antimicrobiana e pode estar relacionada à sua disponibilidade no meio de cultura. Entretanto, a comparação deve ser interpretada considerando que os discos padrão e os hidrogéis apresentam características físicas e de liberação distintas, não sendo possível estabelecer equivalência terapêutica apenas com base nos halos de inibição.

As diferenças observadas entre as bactérias podem estar relacionadas às características estruturais dos microrganismos e ao espectro de ação dos antimicrobianos. A E. coli, por ser uma bactéria Gram-negativa, apresenta membrana externa rica em lipopolissacarídeos, que constitui uma barreira adicional à entrada de determinadas substâncias. Em contrapartida, a atividade observada do hidrogel-base frente à S. aureus pode estar relacionada à atividade antimicrobiana intrínseca da quitosana, descrita como mais evidente frente a bactérias Gram-positivas. Esses aspectos podem contribuir para explicar o comportamento distinto das formulações observado entre as duas espécies bacterianas.

Os resultados obtidos são compatíveis com estudos que destacam o potencial de hidrogéis à base de PVA e quitosana como sistemas para incorporação e liberação de agentes antimicrobianos. Ahmed e Ikram (2016) descrevem aplicações da quitosana em sistemas biomédicos e seu potencial antimicrobiano, enquanto Boateng e Catanzano (2015) destacam a utilização de hidrogéis em sistemas de liberação de fármacos e curativos terapêuticos. Rinaudo (2006) também ressalta as propriedades antimicrobianas da quitosana, especialmente sua interação com a superfície bacteriana. Mais recentemente, Rostamzadeh et al. (2025) avaliaram hidrogéis de PVA/quitosana contendo cefazolina e observaram halos de inibição de 24,4 ± 0,5 mm para E. coli e 37 ± 1 mm para S. aureus. No presente estudo, foram observados halos de até 50 mm para E. coli com ciprofloxacino e de até 44 mm para S. aureus com sulfametoxazol + trimetoprima. Embora os antibióticos e as condições experimentais sejam diferentes, esses resultados reforçam o potencial da matriz PVA/quitosana para aplicações antimicrobianas.

Conclusão

Os hidrogéis de PVA/quitosana contendo ciprofloxacino e sulfametoxazol + trimetoprima apresentaram atividade antimicrobiana frente a Escherichia coli e Staphylococcus aureus, com resultados iguais ou superiores aos discos padrão na maioria das condições avaliadas.

Os melhores resultados frente à E. coli foram observados com ciprofloxacino, com halos de até 50 mm, e sulfametoxazol + trimetoprima, com halos de até 42 mm. Frente à S. aureus, destacaram-se o sulfametoxazol + trimetoprima, com halos de até 44 mm. A atividade observada no hidrogel-base frente à S. aureus também sugere contribuição da quitosana para o efeito antimicrobiano.

De modo geral, os resultados indicam que a matriz de PVA/quitosana apresenta potencial para a incorporação e liberação de agentes antimicrobianos, constituindo uma alternativa promissora para o desenvolvimento de sistemas de liberação local de antibióticos e biomateriais destinados a aplicações antimicrobianas.

Entretanto, esses resultados abrem novas possibilidades de aplicação dos hidrogéis na área biomédica. Embora novos estudos ainda sejam necessários, os achados reforçam seu potencial como sistemas de liberação local de antimicrobianos.

Referências

AHMED, S.; IKRAM, S. Chitosan: Derivatives, composites and applications. Journal of Biomedical Materials Research, v. 104, n. 10, p. 2632–2643, 2016.

BOATENG, J. S.; CATANZANO, O. Advanced therapeutic dressings for effective wound healing: A review. Journal of Pharmaceutical Sciences, v. 104, n. 11, p. 3653-3680, 2015.

CLINICAL AND LABORATORY STANDARDS INSTITUTE (CLSI). Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing. 35. ed. Wayne: CLSI, 2024.

RINAUDO, M. Chitin and chitosan: Properties and applications. Progress in Polymer Science, v. 31, n. 7, p. 603-632, 2006.

ROSTAMZADEH, P.; ZAREI, M.; AMINIFAZL, M. S.; FARSHI AZHAR, F.; NOFOUZI, K. Enhancing production efficiency: Preparation, optimization, and characterization of polyvinyl alcohol/chitosan antibacterial hydrogels. International Journal of Biological Macromolecules, v. 316, pt. 1, 144472, 2025. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.144472.

AHMED, E. M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. Journal of Advanced Research, Cairo, v. 6, n. 2, p. 105-121, 2015.

BRUNTON, L. L.; HILAL-DANDAN, R.; KNOLLMANN, B. C. Goodman & Gilman: As bases farmacológicas da terapêutica. 14. ed. Porto Alegre: AMGH, 2023.

COATES, J. Interpretation of Infrared Spectra: A Practical Approach. In: MEYERS, R. A. (Ed.). Encyclopedia of Analytical Chemistry. Chichester: John Wiley & Sons, 2000. p. 10815-10837.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. Elements of X-Ray Diffraction. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

DASH, M.; CHIELLINI, F.; OTTENBRITE, R. M.; CHIELLINI, E. Chitosan: A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications. Progress in Polymer Science, Oxford, v. 36, n. 8, p. 981-1014, 2011.

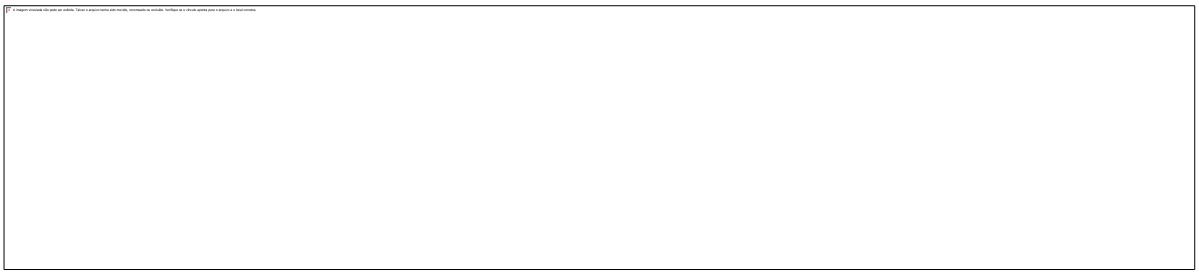
GOLDSTEIN, J.; NEWBURY, D.; JOY, D.; LYM, J.; ECHLIN, P.; LIFSHIN, E.; SAWYER, L.; MICHAEL, J. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. 4. ed. New York: Springer, 2018.

MURRAY, P. R.; ROSENTHAL, K. S.; PFALLER, M. A. Microbiologia Médica. 9. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2021.

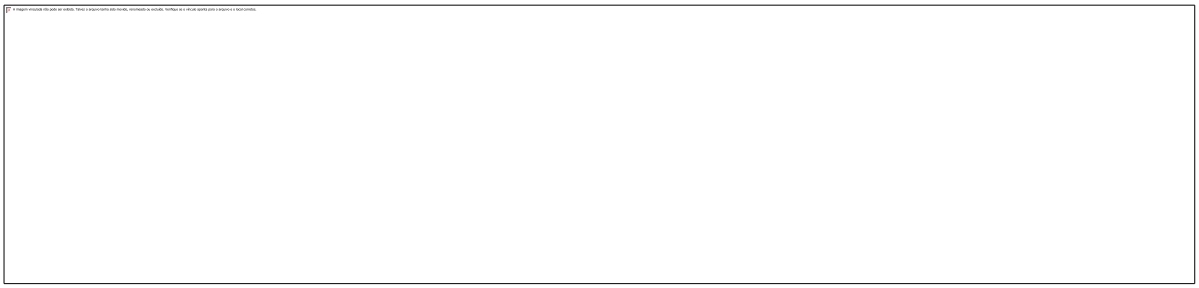
PEPPAS, N. A.; HUANG, Y.; TORRES-LUGO, M.; WARD, J. H.; ZHANG, J. Physicochemical foundations and structural design of hydrogels in medicine and biology. Annual Review of Biomedical Engineering, Palo Alto, v. 2, p. 9-29, 2000.

TONG, S. Y. C.; DAVIS, J. S.; EICHENBERGER, E.; HOLLAND, T. L.; FOWLER JUNIOR, V. G. Staphylococcus aureus infections: epidemiology, pathophysiology, clinical manifestations, and management. Clinical Microbiology Reviews, Washington, v. 28, n. 3, p. 603-661, 2015.

Anexos



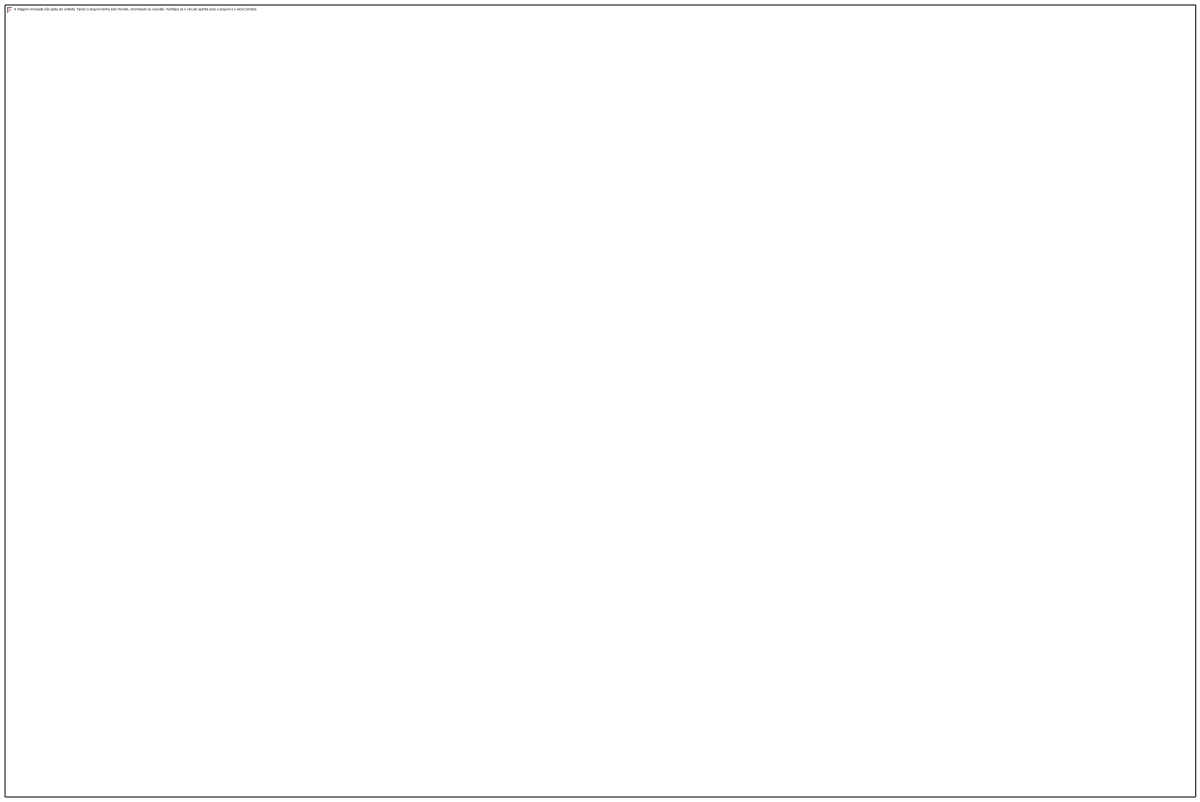
anexos



anexos



anexos



anexos

CÓDIGO: ET0233

AUTOR: LUCAS TIONACIO COSTA DE MEDEIROS

ORIENTADOR: ANDRE LUIS LOPES MORIYAMA

TÍTULO: ESTUDO DA DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA DE AZUL DE METILENO COMO CONTAMINANTE MODELO DE EFLUENTE TÊXTIL UTILIZANDO COMPÓSITO ARGILA/Nb2O5 SOB IRRADIAÇÃO SOLAR

Resumo

A geração de efluentes pela indústria têxtil constitui um desafio ambiental devido à presença de corantes e outros compostos orgânicos de difícil remoção. Nesse contexto, a fotocatálise heterogênea apresenta-se como alternativa de interesse para o tratamento de águas contaminadas, especialmente quando associada à utilização de radiação solar. Este trabalho avaliou a aplicação de um compósito de argila e pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) na degradação fotocatalítica de azul de metileno, utilizado como contaminante modelo de efluente têxtil. O material foi preparado em proporção nominal de 85% de argila e 15% de Nb_2O_5, com tratamento térmico em estufa a 105 °C por 24 h e posterior calcinação a 850 °C por 3 h. O ensaio foi conduzido com 1 L de solução de azul de metileno, com concentração de trabalho de aproximadamente 7,89 ppm, sob irradiação solar e vazão de aproximadamente 16 mL min^{-1}. A concentração do corante foi acompanhada por espectrofotometria UV-Visível nos tempos de 0, 10, 20, 35 e 50 min. A absorbância diminuiu de 0,988 para 0,524, correspondendo a uma redução aproximada de 46% da concentração calculada pela curva de calibração. Os resultados indicam que o compósito apresentou atividade no sistema estudado, demonstrando potencial para aplicações em processos fotocatalíticos de tratamento de contaminantes orgânicos.

Palavras-chave: Fotocatálise. Nb2O5. Azul de metileno. Efluente têxtil. Radiação solar

TITLE: PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF METHYLENE BLUE AS A MODEL CONTAMINANT OF TEXTILE WASTEWATER USING A CLAY/Nb2O5 COMPOSITE UNDER SOLAR IRRADIATION

Abstract

The generation of wastewater by the textile industry represents an environmental challenge due to the presence of dyes and other organic compounds that are difficult to remove. In this context, heterogeneous photocatalysis is an interesting alternative for contaminated water treatment, particularly when associated with solar radiation. This study evaluated the application of a clay/niobium pentoxide (Nb_2O_5) composite for the photocatalytic degradation of methylene blue, used as a model contaminant of textile wastewater. The material was prepared with a nominal composition of 85% clay and 15% Nb_2O_5, followed by thermal treatment at 105 °C for 24 h and calcination at 850 °C for 3 h. The treatment was carried out using 1 L of methylene blue solution at approximately 7.89 ppm, under solar irradiation and a flow rate of approximately 16 mL min^{-1}. Dye concentration was monitored by UV-Visible spectrophotometry at 0, 10, 20, 35 and 50 min. Absorbance decreased from 0.988 to 0.524, corresponding to an approximate 46% reduction in the calculated dye concentration. The results indicate that the composite exhibited activity under the studied conditions, showing potential for photocatalytic treatment of organic contaminants.

Keywords: Photocatalysis. Nb2O5. Methylene blue. Textile wastewater. Solar radia

Introdução

1. Introdução

A indústria têxtil possui grande importância econômica, porém seus processos produtivos estão associados à geração de efluentes que podem apresentar elevada coloração e diferentes compostos orgânicos. A presença de corantes em águas residuárias é particularmente relevante, pois essas moléculas podem apresentar estabilidade química e dificultar a remoção por tratamentos convencionais. Dessa forma, o desenvolvimento de alternativas capazes de reduzir a concentração desses contaminantes contribui para a melhoria da qualidade dos efluentes e para a redução de impactos ambientais.

Entre as tecnologias estudadas para o tratamento de contaminantes orgânicos destacam-se os Processos Oxidativos Avançados (POAs). A fotocatálise heterogênea constitui uma dessas alternativas e utiliza materiais semicondutores que, quando submetidos à radiação adequada, promovem processos de transferência de carga e formação de espécies reativas capazes de participar da transformação de moléculas orgânicas. A utilização de radiação solar apresenta ainda interesse por empregar uma fonte de energia disponível naturalmente.

O pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) vem sendo estudado como material fotocatalítico devido à sua estabilidade e à capacidade de participar de processos de degradação de contaminantes. De Moraes et al. [1] avaliaram óxidos de nióbio na fotodegradação de azul de metileno e observaram que a eficiência do processo foi influenciada pela quantidade de catalisador, concentração inicial do corante e fonte de radiação. Os

autores também destacaram a importância das características superficiais do material para o desempenho fotocatalítico.

Em estudo utilizando Nb_2O_5 suportado em óxidos mistos, Carvalho et al. [2] observaram elevada degradação do azul de metileno sob luz solar, demonstrando a possibilidade de aplicação do óxido de nióbio em sistemas heterogêneos acionados por uma fonte de radiação natural. Os resultados também evidenciaram que a composição do material e as condições de operação interferem diretamente na eficiência do tratamento.

Mais recentemente, Rianjanu et al. [3] desenvolveram um material compósito contendo Nb_2O_5 para a remoção de azul de metileno em meio aquoso, combinando processos de adsorção e fotocatálise. O estudo reforça a relevância de materiais compósitos para o tratamento de corantes, uma vez que a interação entre o contaminante e a superfície do material pode contribuir para o processo global de remoção.

O azul de metileno é frequentemente empregado como contaminante modelo em estudos de tratamento de água, permitindo acompanhar a redução de sua concentração por espectrofotometria UV-Visível. No presente trabalho, o corante foi empregado como representação de um contaminante associado a efluentes têxteis, permitindo avaliar o comportamento de um compósito de argila e Nb_2O_5 em um sistema de tratamento sob radiação solar.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a degradação fotocatalítica de azul de metileno em solução aquosa utilizando um compósito argila/Nb_2O_5 sob irradiação solar, acompanhando a redução da absorbância e da concentração calculada do contaminante ao longo do tratamento.

Metodologia

2. Metodologia

2.1 Materiais

Foram utilizados azul de metileno, água destilada, argila e pentóxido de nióbio (Nb_2O_5). O material empregado no tratamento foi preparado na forma de um compósito de argila/Nb_2O_5, com proporção nominal de 85% de argila e 15% de componente à base de nióbio. O sistema experimental foi constituído por um recipiente de alimentação, mangueira de condução, tubo de quartzo contendo o material fotocatalítico e recipiente de coleta.

2.2 Preparação do compósito argila/Nb_2O_5

O material disponibilizado para o estudo necessitou de preparação térmica antes da utilização, uma vez que a simples junção dos pós não apresentava estabilidade física adequada para a aplicação experimental. A formulação foi preparada a partir da argila e da fração de Nb_2O_5 definida para o compósito. Inicialmente, o material foi mantido em

estufa a 105 °C durante aproximadamente 24 h. Em seguida, foi transferido para uma mufla e submetido a tratamento térmico a 850 °C durante 3 h, utilizando uma curva de aumento gradual da temperatura. Após o tratamento, o material foi utilizado no sistema fotocatalítico.

2.3 Preparação da solução de azul de metileno

Foi preparada inicialmente uma solução de azul de metileno com concentração aproximada de 15 ppm. Para isso, utilizou-se aproximadamente 0,0153 g do corante em balão volumétrico de 1 L, completando-se o volume com água destilada. A partir da solução inicial foi realizada uma diluição com água destilada, obtendo-se uma solução de trabalho com concentração aproximada de 7,89 ppm, utilizada no tratamento fotocatalítico.

2.4 Sistema de tratamento fotocatalítico

O tratamento foi realizado com 1 L da solução de azul de metileno. O sistema operou em escoamento único, sem bomba e sem recirculação. A solução foi conduzida por uma mangueira até um tubo de ensaio de quartzo, no qual se encontravam esferas de vidro e o material fotocatalítico disposto na região central. A solução atravessava o tubo por ação do sistema de vazão e, após atingir a extremidade do tubo, era conduzida para outro recipiente. A vazão utilizada foi de aproximadamente 16 mL min^{-1}. O ensaio foi realizado sob radiação solar, aproximadamente entre 10 e 12 h, durante um período de 50 min. Não foi empregada agitação mecânica durante o tratamento.

2.5 Coleta das amostras e análise espectrofotométrica

As amostras foram coletadas diretamente do sistema de tratamento nos tempos de 0, 10, 20, 35 e 50 min. As três primeiras coletas foram realizadas a cada 10 min e, posteriormente, foram realizadas duas coletas com intervalo de 15 min. Após a coleta, as amostras foram encaminhadas diretamente para análise, sem etapa adicional de tratamento.

A determinação da concentração foi realizada por espectrofotometria UV-Visível. Foi utilizada uma curva de calibração para o azul de metileno, com equação $A = 0{,}1195C - 0{,}0167$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0{,}9962$, na qual A representa a absorbância e C a concentração do corante. A concentração de cada amostra foi calculada a partir da absorbância obtida. A redução da concentração foi determinada pela relação entre a concentração de cada tempo e a concentração inicial.

2.6 Caracterização morfológica

A caracterização morfológica do material foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As micrografias foram obtidas em diferentes ampliações, permitindo observar a morfologia e a heterogeneidade superficial do compósito empregado no tratamento.

Resultados e Discussões

3. Resultados e Discussão

A redução da absorbância ao longo do tratamento foi utilizada como indicativo da diminuição da concentração de azul de metileno no sistema. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 1. A concentração foi calculada a partir da curva de calibração, $A = 0{,}1195C - 0{,}0167$, que apresentou $R^2 = 0{,}9962$, indicando elevada linearidade na faixa analisada.

Na condição inicial, correspondente a 0 min de tratamento, a absorbância foi de 0,988, resultando em concentração calculada de aproximadamente 8,4 ppm. Após 10 min, a absorbância diminuiu para 0,845 e a concentração calculada passou para aproximadamente 7,2 ppm, correspondendo a uma redução de cerca de 14% em relação à condição inicial. Aos 20 min, a absorbância atingiu 0,735, com concentração calculada de aproximadamente 6,3 ppm e redução de aproximadamente 25%.

Aos 35 min de tratamento, a absorbância foi reduzida para 0,615, resultando em concentração calculada próxima de 5,3 ppm e redução de aproximadamente 37%. Ao final dos 50 min, a absorbância atingiu 0,524 e a concentração calculada foi de aproximadamente 4,5 ppm. Considerando a concentração inicial calculada, o tratamento promoveu redução aproximada de 46% da concentração do azul de metileno.

Os dados mostram uma tendência contínua de redução da absorbância durante o período avaliado, conforme apresentado na Figura 1. A linha de tendência linear apresenta coeficiente angular negativo, indicando a diminuição da absorbância com o avanço do tempo de tratamento. O ajuste linear aos cinco pontos apresentou R^2 de aproximadamente 0,97, evidenciando uma relação linear forte entre o tempo avaliado e a redução da absorbância dentro do intervalo experimental considerado.

A maior redução ocorreu nos primeiros minutos do tratamento, seguida por uma diminuição progressiva da velocidade aparente de remoção. Esse comportamento pode estar relacionado à própria redução da quantidade de moléculas de corante disponíveis no meio ao longo do processo. Entretanto, como o sistema foi conduzido em escoamento único e sem recirculação, outros fatores, como tempo efetivo de contato entre a solução e o material, vazão e características do reator, também podem influenciar o comportamento observado.

Os resultados apresentam concordância qualitativa com estudos anteriores que demonstraram a capacidade de materiais contendo Nb_2O_5 de promover a remoção fotocatalítica do azul de metileno. De Moraes et al. [1] observaram que a eficiência do processo depende da concentração do corante, da quantidade de catalisador e da fonte de radiação, mostrando que alterações nas condições experimentais podem modificar significativamente o desempenho do tratamento. No presente estudo, a utilização de radiação solar e de um compósito suportado em argila diferencia o sistema empregado, impossibilitando uma comparação direta das eficiências.

Carvalho et al. [2] demonstraram a aplicação de Nb_2O_5 suportado em óxidos mistos para a degradação de azul de metileno utilizando luz solar, alcançando elevada remoção em tempos de tratamento maiores que os empregados no presente estudo. A comparação

indica que o tempo de exposição e a configuração do material são fatores relevantes para a eficiência global. O resultado obtido neste trabalho, embora inferior ao observado naquele sistema, deve ser interpretado considerando as diferenças de composição do catalisador, concentração inicial, quantidade de material, geometria do reator e regime de escoamento.

Rianjanu et al. [3] também demonstraram o potencial de materiais compósitos contendo Nb_2O_5 para a remoção de azul de metileno, destacando a contribuição conjunta de fenômenos de adsorção e fotocatálise. A utilização de uma matriz de argila no presente estudo pode exercer papel importante na interação superficial com o contaminante, além de contribuir para a organização física do material no sistema de escoamento. Entretanto, não foram realizados ensaios independentes de adsorção ou controles de fotólise neste trabalho; portanto, a redução observada deve ser apresentada como resultado global do tratamento fotocatalítico nas condições estudadas.

A caracterização por MEV mostrou uma superfície heterogênea, constituída por partículas de diferentes dimensões e regiões com aspecto irregular e rugoso. Nas ampliações utilizadas, observa-se uma estrutura com diferentes níveis de aglomeração e porosidade aparente. Essa morfologia é compatível com a presença de uma matriz argilosa submetida a tratamento térmico e incorporada ao material contendo Nb_2O_5. As micrografias não permitem, isoladamente, determinar a distribuição química do nióbio, mas fornecem informações relevantes sobre a estrutura superficial do material utilizado no tratamento.

De forma geral, os resultados demonstram que o compósito argila/Nb_2O_5 foi capaz de reduzir progressivamente a concentração calculada de azul de metileno durante o tratamento sob radiação solar. A redução de aproximadamente 46% após 50 min indica atividade do sistema nas condições avaliadas e fornece uma base para estudos posteriores de otimização. Entre os parâmetros que podem ser investigados destacam-se a vazão, a quantidade de material fotocatalítico, a concentração inicial do corante, o tempo de exposição e a configuração do reator.

Conclusão

4. Conclusão

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que o compósito argila/Nb_2O_5 apresentou capacidade de promover a redução da concentração de azul de metileno durante o tratamento sob irradiação solar. A absorbância diminuiu de 0,988 para 0,524 ao longo de 50 min, correspondendo a uma redução calculada de aproximadamente 46% da concentração do contaminante.

O comportamento progressivo de redução observado demonstra atividade do sistema nas condições avaliadas. A utilização de um compósito contendo Nb_2O_5, associado a uma matriz de argila e acionado por radiação solar, apresenta potencial para estudos voltados ao tratamento de contaminantes orgânicos relacionados a efluentes têxteis.

Apesar do resultado obtido, o sistema ainda apresenta possibilidade de otimização. Estudos posteriores podem avaliar diferentes vazões, concentrações iniciais, massas de material, tempos de tratamento e configurações do reator, além da realização de ensaios de controle para separar os efeitos de adsorção, fotólise e fotocatálise. Dessa forma, os resultados obtidos constituem uma base para o aprimoramento do processo em trabalhos futuros.

Referências

Referências

[1] DE MORAES, N. P.; SILVA, F. N.; DA SILVA, M. L. C. P.; CAMPOS, T. M. B.; THIM, G. P.; RODRIGUES, L. A. Methylene blue photodegradation employing hexagonal prism-shaped niobium oxide as heterogeneous catalyst: Effect of catalyst dosage, dye concentration, and radiation source. Materials Chemistry and Physics, v. 214, p. 95–106, 2018. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.04.063.

[2] CARVALHO, G. S. G.; SIQUEIRA, M. M.; NASCIMENTO, M. P.; OLIVEIRA, M. A. L.; AMARANTE, G. W. Nb_2O_5 supported in mixed oxides catalyzed mineralization process of methylene blue. Heliyon, v. 6, e04128, 2020. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04128.

[3] RIANJANU, A.; MARPAUNG, K. D. P.; MELATI, E. K. A.; AFLAHA, R.; WIBOWO, Y. G.; MAHENDRA, I. P.; YULIANTO, N.; WIDAKDO, J.; TRIYANA, K.; WASISTO, H. S.; TAHER, T. Integrated adsorption and photocatalytic removal of methylene blue dye from aqueous solution by hierarchical Nb_2O_5@PAN/PVDF/ANO composite nanofibers. Nano Materials Science, v. 6, n. 1, p. 96–105, 2024. DOI: 10.1016/j.nanoms.2023.10.006.

Anexos — Figuras e gráficos

Anexos



Tabela 1 — Absorbância, concentração calculada e redução da concentração de azul de metileno.

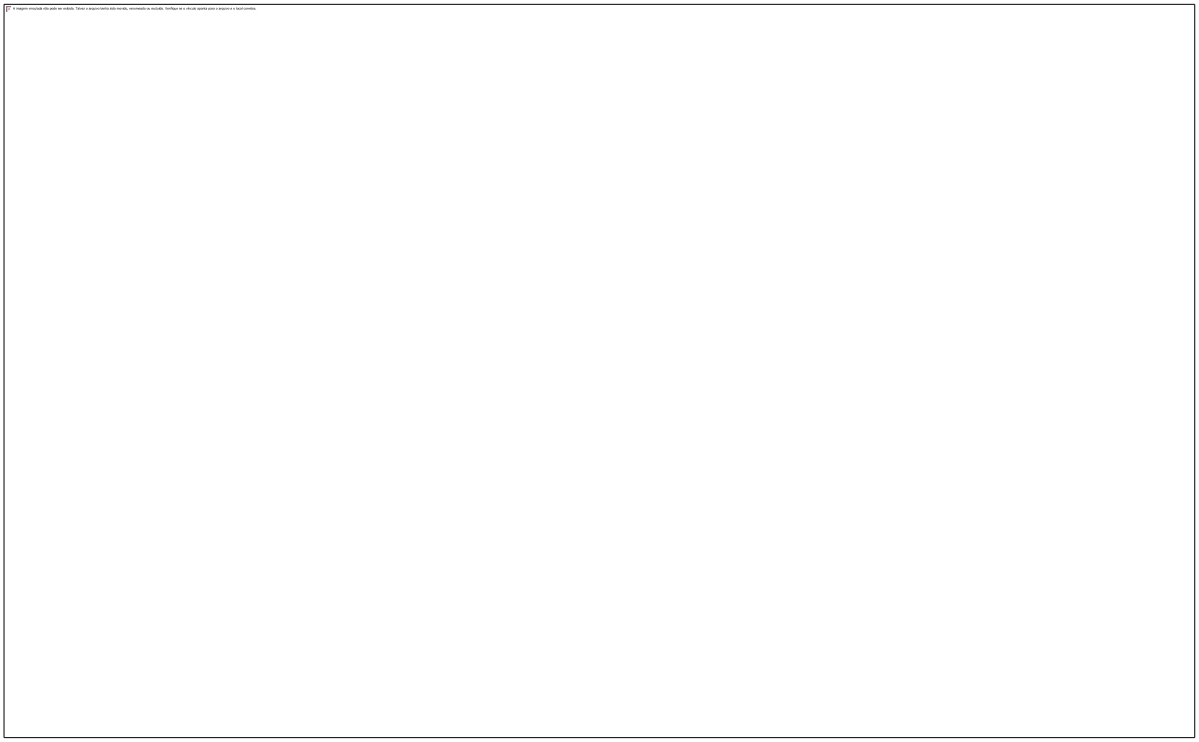


Figura 1 — Variação da absorbância do azul de metileno durante o tratamento, com os pontos experimentais e a linha de tendência linear.

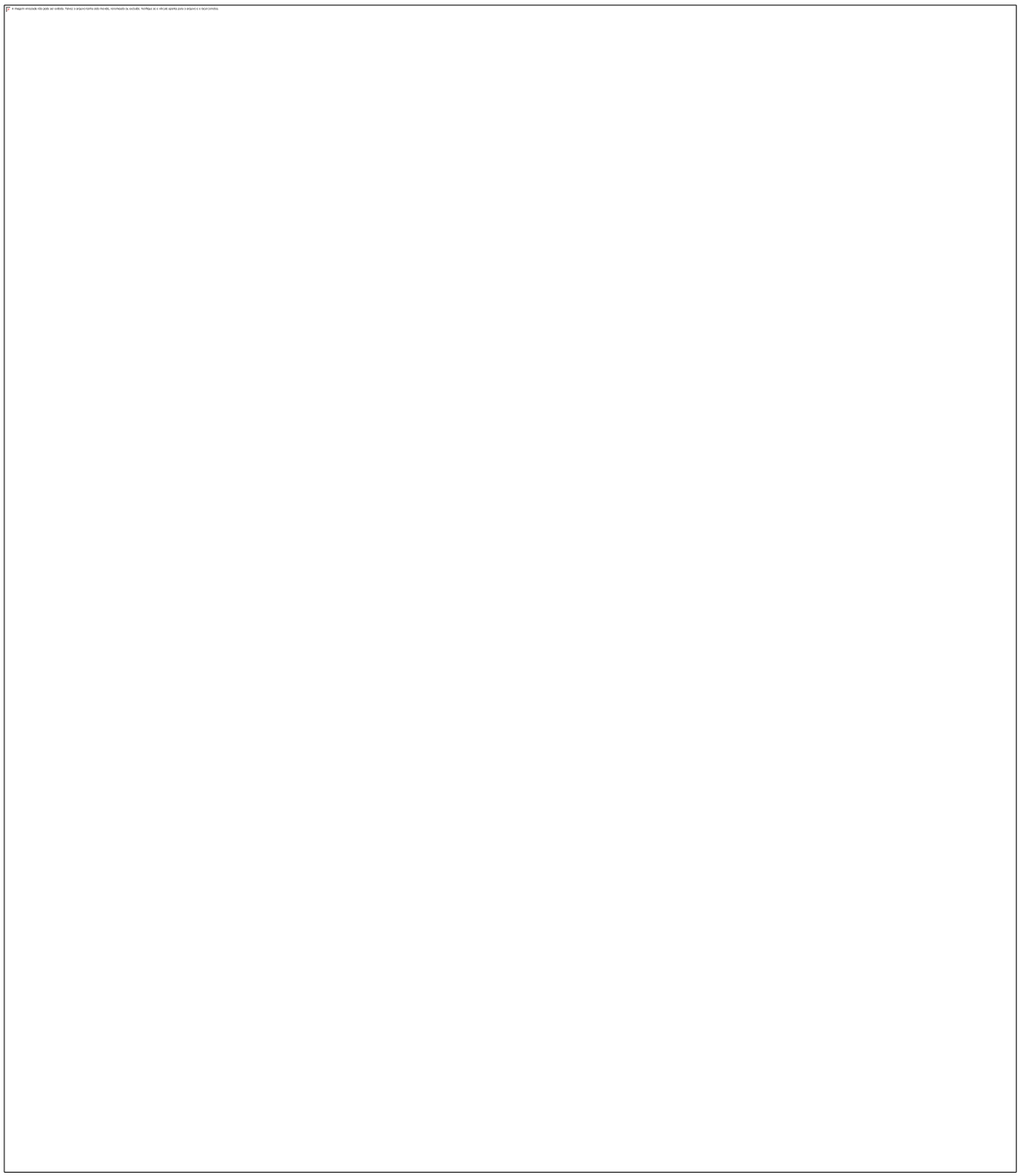


Figura 2 — Micrografia obtida por MEV do compósito argila/Nb2O5, ampliação de 114×, escala de 500 µm.

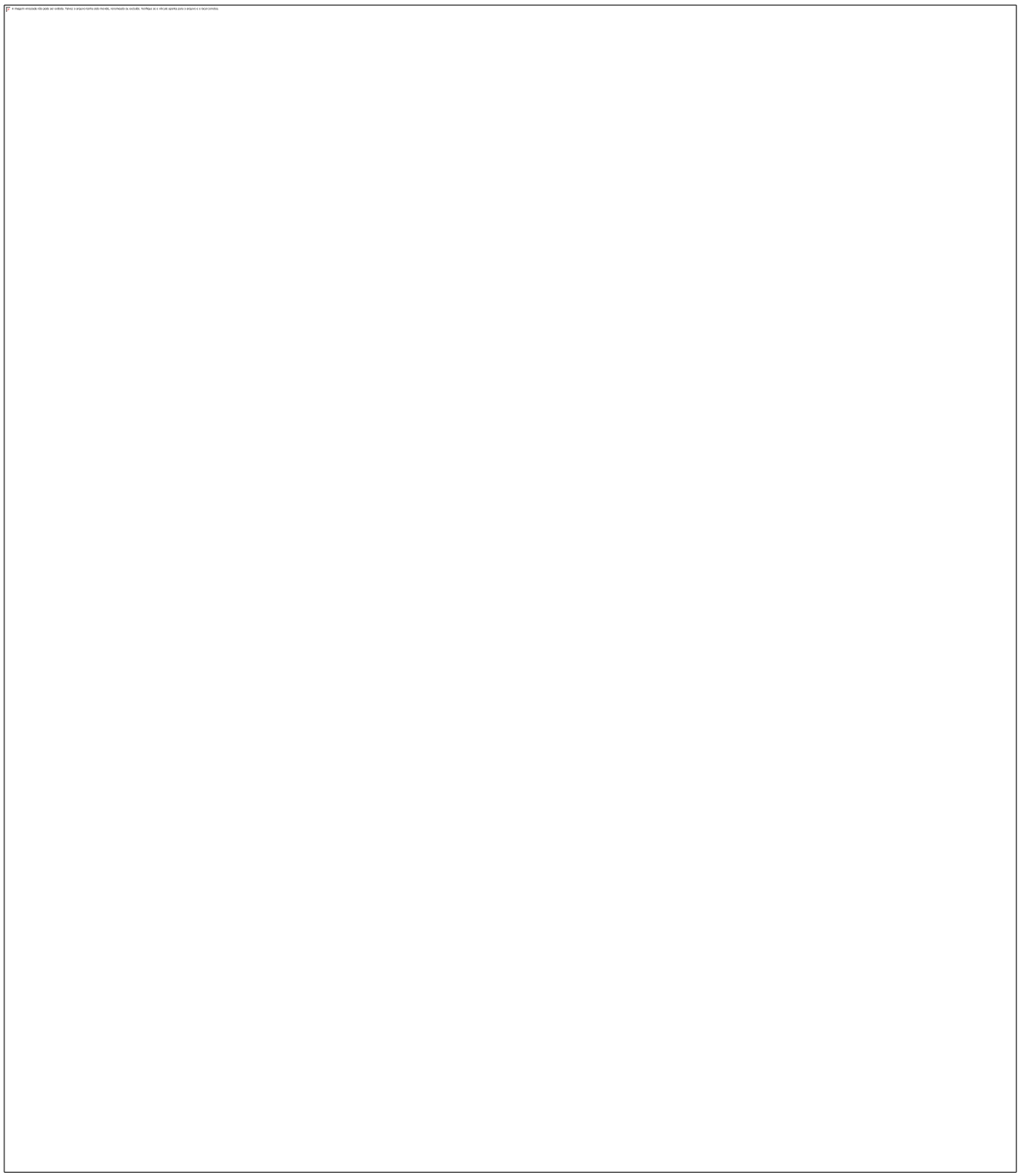


Figura 3 — Micrografia obtida por MEV do compósito argila/Nb2O5, ampliação de 515×, escala de 100 µm.

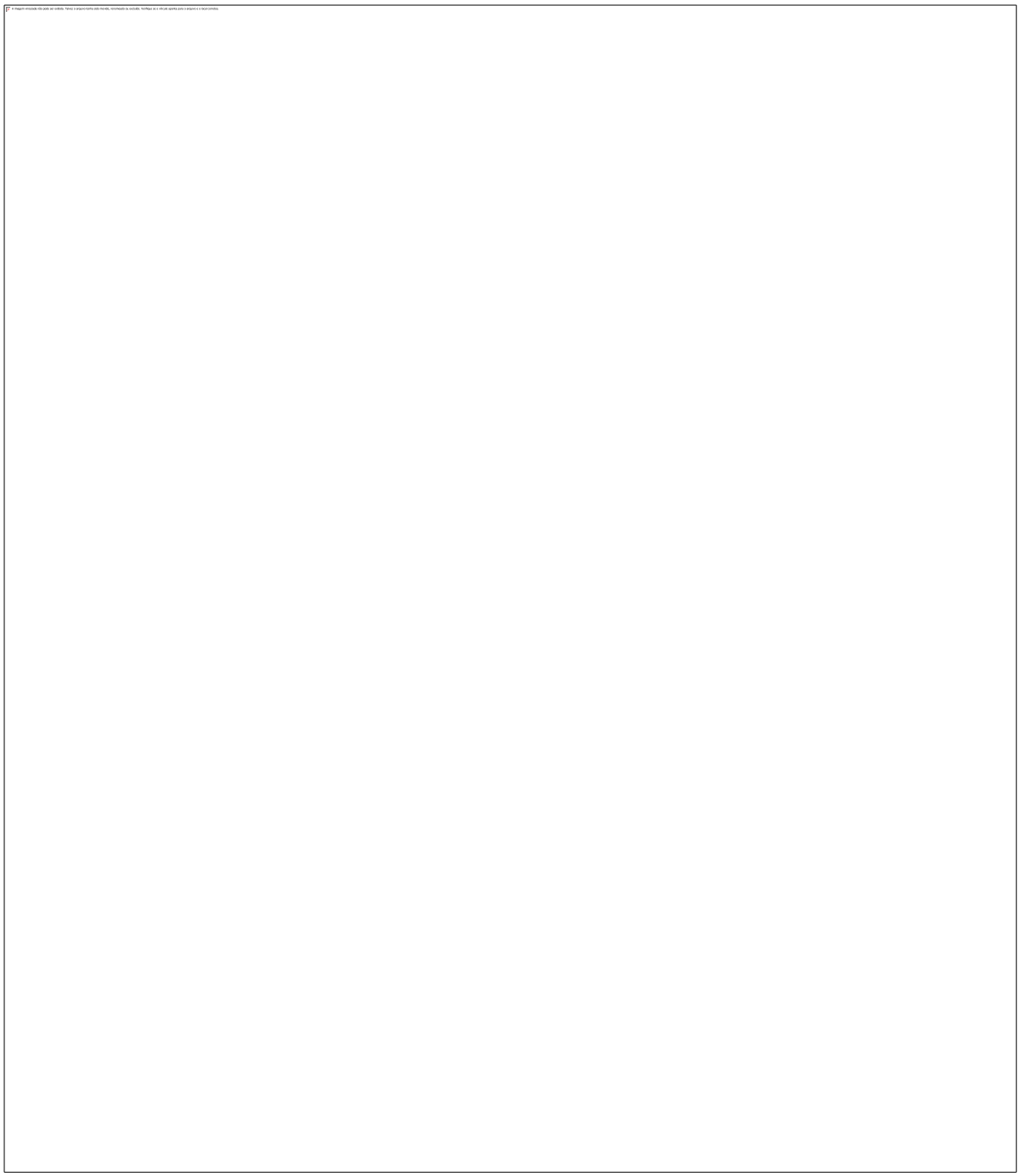


Figura 4 — Micrografia obtida por MEV do compósito argila/Nb2O5, ampliação de 3,45 k×, escala de 20 µm.

CÓDIGO: ET0271

AUTOR: SAHRA MEDEIROS DE MORAIS

ORIENTADOR: DANY GERALDO KRAMER CAVALCANTI E SILVA

TÍTULO: FUNCIONALIZAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS PARA AVALIAÇÃO ANTIBACTERIANA

Resumo

Motivada pela necessidade de novas estratégias contra a resistência bacteriana, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de um hidrogel à base de álcool polivinílico (PVA) e quitosana para a liberação controlada de doxiciclina. O biopolímero, puro e carregado com o fármaco, foi submetido a análises de FTIR, MEV, DRX, ensaios de intumescimento e testes microbiológicos. A atividade antimicrobiana foi avaliada por diluição em tubo e difusão em placa. A análise por MEV indicou uma estrutura porosa associada à reticulação, com aspecto homogêneo no hidrogel funcionalizado. A interação entre os componentes foi confirmada por DRX ($2\theta \approx 20°$) e FTIR (3280 cm^{-1}). O intumescimento em água destilada atingiu 192% no hidrogel puro e 166% no carreado com o antibiótico. A atividade frente a Staphylococcus aureus mostrou-se efetiva, evidenciada pela ausência de turbidez em tubo e pela formação de halo médio de inibição de 25mm em placa. Os resultados indicam o potencial do biomaterial para o tratamento tópico de infecções causadas por bactérias Gram-positivas, favorecendo a hidratação e a cicatrização de feridas.

Palavras-chave: Hidrogel. Álcool polivinílico. Quitosana. Doxiciclina.

TITLE: Functionalization of Polymeric Materials for Antibacterial Evaluation

Abstract

Driven by the need for new strategies against bacterial resistance, this research proposes the development of a polyvinyl alcohol (PVA) and chitosan-based hydrogel for the controlled release of doxycycline. The biopolymer—both in its pure form and loaded with the drug—was subjected to FTIR, SEM, and XRD analyses, as well as swelling and microbiological assays. Antimicrobial activity was evaluated using tube dilution and plate diffusion methods. SEM analysis revealed a porous structure associated with

cross-linking, with a homogeneous appearance in the functionalized hydrogel. Interaction between the components was confirmed by XRD ($2\theta \approx 20°$) and FTIR (3280 cm^{-1}). Swelling in distilled water reached 192% for the pure hydrogel and 166% for the antibiotic-loaded hydrogel. Activity against *Staphylococcus aureus* proved effective, evidenced by the absence of turbidity in the tube and the formation of a mean inhibition zone of 25 mm on the plate. The results indicate the biomaterial's potential for the topical treatment of infections caused by Gram-positive bacteria, while also promoting hydration and wound healing.

KEYWORDS: Hydrogel. Polyvinyl alcohol. Chitosan. Doxycycline.

Keywords: KEYWORDS: Hydrogel. Polyvinyl alcohol. Chitosan. Doxycycline.

Introdução

A resistência bacteriana é um fenômeno adaptativo natural decorrente de mutações genéticas e pressões seletivas que buscam a continuidade da proliferação dos microrganismos. Por essa razão, a simples descoberta de novos fármacos ou a elevação posológica mostram-se insuficientes para contornar o problema (Machado et al., 2019). Esse cenário configura uma preocupação global de saúde pública diante do avanço da multirresistência antimicrobiana (MDR), impulsionada pelo uso excessivo de antibióticos, automedicação, descarte inadequado e a disseminação de patógenos hospitalares em pacientes com imunidade comprometida (Rajput et al., 2024).

A doxiciclina é um antibiótico da classe das tetraciclinas de amplo espectro, eficaz contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, aeróbias e anaeróbias. A sua entrada nas células bacterianas ocorre por meio de porinas e transporte ativo dependente de gradiente de pH. Além da ação antimicrobiana direta e do efeito pós-antibiótico dependente da concentração, o fármaco apresenta propriedades anti-inflamatórias, antineoplásicas e de estímulo à cicatrização. Em dosagens sub antimicrobianas, inibe metaloproteinases de matriz (MMPs) e previne a degradação de colágeno tecidual, tornando promissora a transposição do seu uso tradicional para a aplicação tópica na pele (Holmes, 2009).

Como alternativa aos métodos convencionais, destaca-se o desenvolvimento de hidrogéis estruturas tridimensionais biocompatíveis com alta capacidade de absorção de água e liberação controlada de ativos (Qi et al., 2023). O álcool polivinílico (PVA) é um polímero sintético semicristalino, atóxico e hidrossolúvel, com excelente capacidade ligante e formadora de filme. Já a quitosana, biopolímero natural derivado da quitina, agrega propriedades antioxidantes e regenerativas, embora apresente baixa resistência mecânica quando utilizada de forma isolada. A blenda entre PVA e quitosana une as vantagens de ambos os materiais, superando suas limitações individuais (Thirupathi et al., 2022; Lv et al., 2023).

A incorporação de agentes antimicrobianos a matrizes de hidrogel permite a criação de curativos biocompatíveis que mantêm a umidade no leito da lesão, atuam como barreira contra contaminantes e auxiliam na reepitelização com menor risco de efeitos adversos sistêmicos (Rata et al., 2021; Wang et al., 2023). Com base nisso, este trabalho objetivou o desenvolvimento e a caracterização de um hidrogel de PVA/quitosana funcionalizado com doxiciclina para avaliação antibacteriana in vitro frente a Staphylococcus aureus.

Metodologia

2.1 Reagentes e Materiais

Para a síntese e caracterização dos hidrogéis, foram utilizados: álcool polivinílico (PVA) em pó, quitosana em pó, ácido acético glacial P.A. (pureza de 99%), comprimidos de doxiciclina (500 mg) e água destilada.

2.2 Preparo da Solução de Quitosana

A solução de quitosana (Solução 1) foi preparada mediante a dissolução de 2,5 g do polímero em 100 mL de água destilada acidificada com 0,5 mL de ácido acético glacial P.A., mantendo-se o sistema sob agitação constante durante 4 horas. Em seguida, a solução permaneceu em repouso por 24 horas para desacelerar e foi armazenada por 30 dias para maturação e estabilização estrutural, conforme metodologia adaptada de Silva et al. (2019).

2.3 Preparo da Solução de PVA

A solução de PVA (Solução 2) foi obtida pela dissolução de 15,0 g do polímero em 100 mL de água destilada. A mistura foi submetida a aquecimento a 80 °C sob agitação constante durante 1 hora, garantindo a completa solubilização do material (Iqbal et al., 2021).

2.4 Obtenção do Hidrogel Funcionalizado

A matriz base do hidrogel foi formulada a partir da homogeneização das soluções de PVA (15% m/v) e quitosana (2,5% m/v). O sistema permaneceu sob agitação mecânica por 30 minutos, seguido de banho de ultrassom por mais 30 minutos para a eliminação completa de bolhas. Para a funcionalização, 125 mg de doxiciclina foram previamente solubilizados em 5 mL de água destilada e incorporados a 10 g da matriz polimérica base, permanecendo sob agitação magnética por 1 hora. As amostras foram vertidas em moldes e submetidas à secagem em estufa a 40 °C por 48 horas (casting). Após esse período, as placas foram resfriadas em freezer por 5 minutos para auxiliar na desmoldagem dos filmes poliméricos, que apresentaram aspecto visual uniforme e translúcido (Iqbal et al., 2021).

Resultados e Discussões

Previamente aos ensaios, as amostras de hidrogel foram desinfectadas por exposição à radiação ultravioleta durante 15 minutos. A cepa bacteriana de Staphylococcus aureus, pré-cultivada em caldo BHI (Brain Heart Infusion), foi reativada a 37 °C por 12 horas. Subsequentemente, realizou-se a ressuspensão bacteriana em 5 mL de solução fisiológica (NaCl 0,89%) com o auxílio de alça de platina calibrada, ajustando-se a turbidez até o padrão correspondente à escala 0,5 de McFarland (Silva et al., 2020).

A avaliação em meio líquido foi conduzida em tubos estéreis contendo 1,5 mL de caldo BHI, inoculados com 50 µL da suspensão bacteriana ajustada. Os tratamentos foram organizados em: controle positivo (disco de antibiótico padrão), controle negativo (hidrogel puro de PVA/quitosana, 5 mm²) e triplicata de teste contendo fragmentos do hidrogel funcionalizado (PVA/quitosana/doxiciclina, 5 mm²) (Silva et al., 2020).

Os testes de difusão em meio sólido foram realizados em placas com ágar Mueller-Hinton. A suspensão bacteriana foi semeada uniformemente em três direções com swab estéril para garantir o crescimento confluente do inóculo. Em triplicata, foram dispostos sobre a superfície do ágar fragmentos de hidrogel base puro (5 mm² - controle negativo), fragmentos do hidrogel carreado com doxiciclina (5 mm²) e disco comercial de doxiciclina como controle positivo (Wikanta et al., 2012).

Ao término da montagem experimental, tubos e placas foram incubados em estufa bacteriológica a 37 °C por 24 horas. Nos tubos, a atividade foi avaliada por inspeção visual da turbidez, onde a turvação indicou proliferação microbiana e a límpidez refletiu a inibição do crescimento. Nas placas, mensurou-se o diâmetro dos halos de inibição formados (em milímetros), classificando-se os perfis de sensibilidade de acordo com os padrões da tabela de antibiograma (Laborclin) em: Suscetível (S) para halos ≥ 18 mm, Intermediário (I) de 14 a 17 mm e Resistente (R) para halos ≤ 13 mm (Silva et al., 2020).

3.– RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção do hidrogel foi realizada com sucesso, considerada efetiva uma vez que se obteve amostras estáveis e homogêneas, conforme observam-se as amostras apresentadas pela microscopia óptica.

Figura 1: Hidrogel base (H) e H. com Doxiciclina (C)

Fonte : Autores (2026)

Quando observados sob a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a amostra de Hidrogel com Doxiciclina demonstrou superfície mais porosa em relação a outra sem Doxiciclina .

Figura 2: Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras

A – Hidrogel base ; B - H. com Doxiciclina

Fonte : Autores (2026)

A imagem da amostra A (PVA/QUITOSANA) apresentou uma superfície lisa, enquanto a amostra B (PVA/QUITOSANA/DOXICICLINA) apresentou porosidade. Semelhante ao observado no estudo Karunakaran et al (2024), onde os autores explicaram que a integração do antibiótico a estrutura reticular do hidrogel, principalmente por pontes de hidrogênio, demonstrando sua integração. Reforçado pelo estudo Syukria et al (2024) que indicaram ser este tipo de ligação química, o responsável pela formação de porosidade nos hidrogéis, conforme observação na amostra acima. Como benefício, observará maior capacidade de absorção de água e consequente liberação do princípio ativo.

Figura 3 - FTIR dos hidrogéis: A – Hidrogel base ; B - H. com Doxiciclina

Fonte: Autores (2026)

Outra caracterização realizada, foi a avaliação por FTIR, buscando analisar o perfil de vibração de grupos químicos presentes nas amostras, conforme apresentado na figura 3. Comparando os resultados obtidos no FTIR entre a amostra de hidrogel e de h. Doxiciclina, com o resultados de outros artigos da área como Kundu (2020) e Chopra et al. (2022). Podemos observar uma banda de estiramento do grupo alquila CH foi detectada em 2939 cm^{-1} por FTIR, enquanto a banda de ligação de hidrogênio foi detectada em 3293 cm^{-1} para o PVA. A hidrólise do PVA nesse caso foi associada ao pico em 1720 cm^{-1} , que por sua vez foi relacionado à vibração do grupo -C=O e ao grau de hidrólise do PVA. A quitosana inseriu o anel glicopiranose correspondeu ao pico em aproximadamente 831 cm^{-1} e seus monômeros refletem em picos de estiramentos característicos de O–H, C–H e C–O, e de deformação angular de C–H e C–C. , a flexão em 1080 cm^{-1} é típico da ligação glicosídica baseada no grupo -COC. O estiramento O–H é atribuído a 3393 cm^{-1} . Os picos duplos em 2939-2930 cm^{-1} são atribuídos ao estiramento e à deformação C–H, respectivamente. O estiramento simétrico do COO^{-} é relatado no pico duplo em torno de 1375 cm^{-1} . Um espectro largo em 1080 cm^{-1} é atribuído ao espectro coletivo da ligação glicosídica β- (1→4) antissimétrica e ao modo de flexão C–C. A banda em 831 cm^{-1} é atribuída à deformação C–H glicosídica com vibração do anel (Kundu; Banerjee, 2020; Chopra et al. 2022).

Nesse estudo também foi realizada a análise estrutural de difração de raio X, conhecido como DRX, usado para mensurar a cristalinidade, primeiramente o estudo mostrou um difratograma da amostra padrão de hidrogel, em seguida esta amostra em comparação com a incorporação de fármaco - figura 4.

Observou-se que após a incorporação do antibiótico, houve redução de intensidade do pico amorfo em 20 θ, que é justificado pela integração destes compostos aos demais elementos da matriz polimérica do hidrogel (Choo et al., 2016). Nos gráficos demonstrados acima, verifica-se que houve sobreposição do pico amorfo sobre as faixas cristalinas da Doxiciclina(Elbakush; Albibi 2025).

Figura 4 - DRX dos hidrogéis: A – Hidrogel base ; B - H. com Doxiciclina.

Fonte: Autores (2026)

Observou-se que após a incorporação do antibiótico, houve redução de intensidade do pico amorfo em 20 θ, que é justificado pela integração destes compostos aos demais elementos da matriz polimérica do hidrogel (Choo et al., 2016). Nos gráficos demonstrados acima, verifica-se que houve sobreposição do pico amorfo sobre as faixas cristalinas da Doxiciclina(Elbakush; Albibi 2025).

O ensaio de intumescimento é uma técnica que avalia a higroscopia e estabilidade no material em líquidos, nesse caso, foi utilizado água destilada à temperatura ambiente, e avaliado a variação de peso (absorção de água). Neste estudo os dados do comportamento das amostras foram monitorados a cada 5 minutos, sendo verificado intumescimento máximo de 241,67% para o hidrogel com Doxiciclina- Quadro 1.

Quadro 1: Testes de intumescimento dos hidrogéis do estudo.

Amostra

Peso inicial

Peso final

Grau de intumescimento

Hidrogel

0,1155

0,3377

192,38%

H. Doxiciclina

0,0471

0,1253

166,03%

O entumescimento mais elevado do hidrogel com Doxiciclina é explicado pela maior porosidade superficial, anteriormente demonstrada. Ademais, a presença de mais um soluto (Doxiciclina), contribui para uma maior osmolaridade no sistema, aumentando assim o fluxo de água (Ghauri, et al., 2021). Os dados do presente estudo estão semelhantes ao estudo de Hajukarimi; Sadeghi (2020).

Após as devidas caracterizações, foram realizados testes de atividade antimicrobiana, sendo o primeiro frente a bactéria Staphylococcus aureus através da técnica de difusão em disco, com média 29mm de halo de inibição observado para o hidrogel com Doxiciclina(PVA/QUIT/DOX).

Para fins comparativos utilizou-se como controle positivo o disco de antibiótico de Doxiciclina (Laborclin). Observando-se a inibição S. aureus, com hidrogel a base de Doxiciclina com halo médio de 25mm, sendo considerado assim, sensível (S). Muito superior ao controle positivo, com halo médio de 11 mm (S). Já amostra sem antibiótico não houve formação de halos.

Conclusão

O hidrogel proposto foi efetivamente desenvolvido, conforme demonstrado nos testes de caracterização por microscopia óptica, MEV, FTIR e DRX.

Ademais, demonstrou-se efetividade de liberação da Doxiciclina em diferentes meios (sólido e líquido) promovendo a inibição da bactéria S. aureus, tendo-se halo médio de inibição de 29 mm. Além disso, a adição do antibiótico favoreceu a propriedade de intumescimento característica do hidrogel.

Portanto, os resultados sugerem que o hidrogel PVA/QUITOSANA/CEF apresentam potencial aplicação no tratamento de infecções pela S. aureus possibilitando-se ainda a hidratação da ferida, com aceleração do processo de cicatrização.

Referências

REFERÊNCIAS

ARATEN, A. H. et al. Cephalosporin resistance, tolerance, and approaches to improve their activities. The Journal of Antibiotics, v. 77, n. 3, p. 135-146, 2024.

GHAURI, Z. H. et al. Development and evaluation of pH-sensitive biodegradable ternary blended hydrogel films (chitosan/guar gum/PVP) for drug delivery application. Scientific Reports, v. 11, n. 1, p. 21255, 2021.

HAJIKARIMI, A.; SADEGHI, M. Free radical synthesis of cross-linking gelatin base poly NVP/acrylic acid hydrogel and nanoclay hydrogel as cephalexin drug deliver. Journal of Polymer Research, v. 27, n. 3, p. 57, 2020.

IQBAL, D. N. et al. Enhanced antibacterial activity of chitosan, guar gum and polyvinyl alcohol blend matrix loaded with amoxicillin and doxycycline hyclate drugs. Arabian Journal of Chemistry, v. 14, n. 6, p. 103156, 2021.

KANAN, M. et al. A systematic review on the clinical pharmacokinetics of cephalexin in healthy and diseased populations. Antibiotics, v. 12, n. 9, p. 1402, 2023.

KARUNAKARAN, S. et al. Fabrication of functionalized bio synthetic hydrogels using poly vinyl alcohol and Fucoidan. In: JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES. IOP Publishing, 2024. p. 012047.

Laborclin Produtos para Laboratórios Ltda. Manual de antibiograma. Pinhais: Laborclin, [s.d.]. Disponível em: [https://docente.ifsc.edu.br/Antibiograma%20LABORCLIN.pdf](. Acesso em: 27 dez. 2025.

LV, S. et al. Progress in preparation and properties of chitosan-based hydrogels. International Journal of Biological Macromolecules, v. 242, p. 124915, 2023.

MACHADO, O. V. O. et al. Antimicrobianos: revisão geral para graduandos e generalistas. Fortaleza: EdUnichristus, 2019. E-book.

MANSUOR, S. F. et al. Thermal and structural properties of chitosan/poly (vinyl alcohol) blends. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 118, n. 3, p. 1513-1520, 2014.

NEBLEA, I. E. et al. Redes interpenetrantes de celulose bacteriana e diacrilato de poli(etileno glicol) como potenciais transportadores de cefalexina na terapia de feridas. Journal of Polymer Research, v. 29, n. 9, p. 406, 2022.

QI, X. et al. PVA/WO3–x/Ag2WO4 hydrogel for enhanced photocatalytic disinfection and accelerated wound healing. Langmuir, v. 39, n. 27, p. 9476-9487, 2023.

RAJPUT, P.; NAHAR, K. S.; RAHMAN, K. M. Evaluation of antibiotic resistance mechanisms in gram-positive bacteria. Antibiotics, v. 13, n. 12, p. 1197, 2024.

RATA, D. M. et al. Biocomposite hydrogels for the treatment of bacterial infections. Pharmaceutics, v. 13, n. 12, p. 2079, 2021.

HOLMES, Natasha E.; CHARLES, Patrick GP. Safety and efficacy review of doxycycline. Clinical Medicine: Therapeutics, v. 1, p. CMT.S2035, 2009.

SILVA, G. S. E. D. et al. Antibacterial effect of silver nanoparticles on Klebsiella spp. Healthcare Review, v. 1, n. 2, p. 8-15, 2020.

SILVA, I. O. et al. Multifunctional chitosan/gold nanoparticles coatings for biomedical textiles. Nanomaterials, v. 9, n. 8, p. 1064, 2019.

TEIXEIRA, M. S. Análise de subprodutos de degradação forçada do antibiótico cefalexina. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Paulo, Diadema, 2020.

THIRUPATHI, K. et al. Update on chitosan-based hydrogels: preparation, characterization, and its antimicrobial and antibiofilm applications. Gels, v. 9, n. 1, p. 35, 2022.

CÓDIGO: ET0296

AUTOR: JOEL RODRIGUES DE LIMA

ORIENTADOR: SEBASTIAN YURI CAVALCANTI CATUNDA

TÍTULO: Sistema embarcado de aquisição e monitoramento remoto de temperatura e integração IoT: ESP32 + DS18B20

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um sistema embarcado para aquisição, exibição local e monitoramento remoto de temperatura, ampliado com aquisição de tensão. A plataforma utiliza ESP32, sonda DS18B20, TFT de 2,8 polegadas, módulo ADS1115 e breakout AD5693R. O firmware foi estruturado com FreeRTOS, operação local independente da rede e telemetria MQTT v2; os dados são validados por aplicação Python, armazenados em SQLite e visualizados em dashboard Dash/Plotly. Na validação integrada foram preservados 740 snapshots em 757,3 s: todos continham temperatura válida, 737 continham AIN1 válido e três representaram corretamente dados analógicos desatualizados como nulos. O ADS1115, configurado em 64 SPS, apresentou taxa efetiva média de 49,7355 amostras/s. Como extensão de instrumentação, os módulos baseados em ADS1115 e AD5693R foram caracterizados com uma SMU Keysight B2902A. O Passo A utilizou 20.000 setpoints e 220.000 conversões, com INL best-fit máxima de 1,81 LSB e ruído de 0,776 LSB RMS. No Passo B, 5.120 transições adjacentes apresentaram DNL entre -0,636 e +0,764 LSB. A cadeia DAC-ADC também foi avaliada nos 65.536 códigos. Os resultados demonstram integração funcional, telemetria versionada e coerência entre as caracterizações, respeitadas as limitações metrológicas explicitadas.

Palavras-chave: ESP32. DS18B20. ADS1115. sistemas embarcados. IoT.

TITLE: Embedded System for Temperature Acquisition and Remote Monitoring with IoT Integration: ESP32 + DS18B20

Abstract

This work presents the development and validation of an embedded system for temperature acquisition, local display, and remote monitoring, extended with voltage

acquisition. The platform uses an ESP32, a DS18B20 probe, a 2.8-inch TFT, an ADS1115 module, and an AD5693R breakout. The firmware was structured with FreeRTOS, local operation independent of network availability, and MQTT v2 telemetry; data are validated by a Python application, stored in SQLite, and visualized through a Dash/Plotly dashboard. Integrated validation preserved 740 snapshots over 757.3 s: all contained valid temperature data, 737 contained valid AIN1 data, and three correctly represented stale analog data as null. The ADS1115 was configured at 64 SPS and achieved an average effective rate of 49.7355 samples/s. As an instrumentation extension, the modules based on the ADS1115 and AD5693R were characterized with a Keysight B2902A SMU. Step A used 20,000 setpoints and 220,000 conversions, yielding a maximum best-fit INL of 1.81 LSB and pooled noise of 0.776 LSB RMS. In Step B, 5,120 adjacent transitions showed DNL from -0.636 to +0.764 LSB. The DAC-ADC chain was also evaluated over all 65,536 DAC codes. The results demonstrate functional integration, versioned telemetry, and consistency among the characterization steps within the stated metrological limitations.

Keywords: ESP32. DS18B20. ADS1115. embedded systems. IoT.

Introdução

A medição e o monitoramento de temperatura são relevantes em automação, controle industrial, agricultura, climatização e monitoramento ambiental. A evolução de microcontroladores com conectividade sem fio permite concentrar aquisição, processamento local, interface gráfica e comunicação remota em plataformas de baixo custo. O ESP32 reúne capacidade de processamento, Wi-Fi e periféricos adequados a sistemas embarcados conectados, enquanto o DS18B20 fornece medição digital de temperatura pelo barramento 1-Wire (ESPRESSIF SYSTEMS, 2025; ANALOG DEVICES, 2019).

O trabalho foi desenvolvido no âmbito do plano PIBIC CNPq “Sistema embarcado de aquisição e monitoramento remoto de temperatura e integração IoT: ESP32 + DS18B20”, vinculado ao projeto PVG23522-2025 - Circuitos e Sistemas para Instrumentação, Medição e Interfaceamento com Sensores. O objetivo central foi construir uma plataforma capaz de adquirir temperatura, apresentar o estado localmente e disponibilizar as medições por rede, percorrendo o ciclo completo de um sistema de instrumentação conectado. A implementação atual utiliza uma placa Guition JC2432W328, baseada em ESP32-WROOM-32 e TFT de 2,8 polegadas, com interface gráfica em LVGL (GUITION, s.d.). O trabalho foi desenvolvido com bolsa PIBIC financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), com apoio institucional da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

A arquitetura foi ampliada com um módulo breakout baseado no ADC ADS1115, conversor delta-sigma de 16 bits com interface I2C, para aquisição de tensão, e com uma breakout Adafruit baseada no DAC AD5693R, conversor de 16 bits com referência interna de 2,5 V (TEXAS INSTRUMENTS, 2024; ANALOG DEVICES, 2024). Essa

ampliação é coerente com o projeto de instrumentação e permitiu avaliar não apenas a integração funcional, mas também o comportamento estático da cadeia analógica.

Para comunicação remota foi adotado MQTT, protocolo de publicação/assinatura adequado ao desacoplamento entre dispositivo e consumidor (OASIS, 2019). O ESP32 publica snapshots versionados; uma aplicação Python valida e persiste as mensagens em SQLite e um dashboard Dash/Plotly apresenta temperatura, tensão e estado do sistema. O firmware foi organizado sobre FreeRTOS, com aquisição, interface e rede logicamente desacopladas, de modo que falhas de Wi-Fi, broker ou sincronização de tempo não interrompam as funções locais.

Além dos testes do sistema principal, foi realizada caracterização complementar do módulo baseado no ADS1115, da breakout Adafruit baseada no AD5693R e da cadeia DAC-ADC com uma unidade fonte e medida Keysight B2902A. Os ensaios foram automatizados, com preservação de dados brutos, scripts e métricas para auditoria. O objetivo dessas campanhas foi quantificar ganho, offset, linearidade, ruído, DNL em regiões adjacentes e consistência entre diferentes configurações, sem confundir caracterização experimental com calibração rastreável.

Assim, o trabalho combina desenvolvimento embarcado, comunicação IoT, persistência e visualização de dados com uma etapa complementar de instrumentação de precisão. A avaliação considera simultaneamente funcionalidade, robustez do fluxo de telemetria e limitações metrológicas dos ensaios executados.

Metodologia

O sistema principal foi implementado na plataforma Guition JC2432W328, baseada em ESP32-WROOM-32 e TFT de 2,8 polegadas. Os periféricos externos foram empregados como conjuntos comerciais prontos, sem montagem direta dos respectivos CIs na protoboard: sonda encapsulada baseada no DS18B20, módulo breakout baseado no ADS1115 e breakout Adafruit baseada no AD5693R. A sonda DS18B20 foi ligada ao GPIO17 pelo barramento 1-Wire com resistor de pull-up externo de 4,7 kΩ. O barramento I2C externo utiliza GPIO21/SDA e GPIO22/SCL a 100 kHz. O módulo ADS1115 opera no endereço 0x48, com ADDR ligado ao GND e pull-ups de 4,7 kΩ soldados entre VDD-SDA e VDD-SCL; a breakout AD5693R opera em 0x4C. Na montagem corrente, VOUT da breakout AD5693R está ligado a AIN1 do módulo ADS1115. Apenas AIN1 permanece habilitado no firmware principal; os demais canais ficam desabilitados até receberem função definida. O AD5693R é inicializado em estado seguro e não recebe controle remoto nesta etapa.

O firmware foi desenvolvido com ESP-IDF/FreeRTOS. A inicialização prioriza operação local: interface, I2C, DAC, DS18B20 e ADS1115 são disponibilizados antes da dependência de rede. Wi-Fi, MQTT e sincronização de tempo são iniciados de forma assíncrona. As aquisições atualizam estruturas com valor, validade, instante da última leitura válida e erro. Staleness é derivada do tempo decorrido, evitando representar falha como zero. O display utiliza uma cópia coerente do estado e é atualizado

aproximadamente a 4 Hz; a aquisição do ADC permanece independente da interface. O ADS1115 é configurado em 64 SPS e sua taxa efetiva é medida em execução.

A telemetria utiliza um contrato MQTT v2 publicado aproximadamente a 1 Hz com QoS 1. Cada snapshot contém device_id, boot_id aleatório por inicialização, sequence crescente, uptime, horário Unix quando sincronizado, flags de validade/staleness e as grandezas habilitadas. A sequência é consumida quando o snapshot é preparado, de modo que lacunas observadas no receptor indiquem snapshots ausentes sem atribuir automaticamente a causa ao transporte. Valores inválidos são representados como null, preservando a distinção entre ausência de leitura e zero físico.

No computador, mqtt_logger_v2.py assina o tópico versionado, valida tamanho, UTF-8, JSON, versão do schema, identidade e tipos, calcula SHA-256 do payload e persiste os dados em SQLite. A chave lógica (device_id, boot_id, sequence) permite deduplicar retransmissões de QoS 1. A tabela measurements_v2 é mantida separada da tabela histórica temperaturas. O dashboard_final_v002.py consulta exclusivamente measurements_v2 e apresenta temperatura, AIN1, estado geral, validade, metadados do dispositivo e janelas temporais de 1, 5, 15 e 60 min. O estado ONLINE/ATRASADO/OFFLINE é inferido pela idade do último registro recebido.

A validação integrada do sistema principal foi realizada com o firmware normal, logger e dashboard em operação. Foram registrados contadores de amostras, sequência, validade, taxa efetiva do ADS1115, estados de rede e margem de pilha. A execução preservada em dados/sistema/temperaturas_validacao_v2_20260811.db foi usada como snapshot reprodutível do baseline.

A caracterização complementar foi dividida em três passos. A automação da Keysight B2902A utilizou comandos SCPI conforme a referência de programação do instrumento (KEYSIGHT TECHNOLOGIES, 2019). No Passo A, a B2902A operou como fonte de tensão para o ADS1115. Force High foi conectado a AIN1 e Force Low ao GND físico local do módulo, em conexão de dois fios com Sense e Guard abertos, conforme a documentação do instrumento (AGILENT TECHNOLOGIES, 2011). Foram aplicados 20.000 setpoints entre 0 e 2,5 V; em cada ponto uma conversão foi descartada e dez foram preservadas, totalizando 220.000 conversões. Foram calculados regressão linear, erro de ganho aparente, offset, INL best-fit, INL endpoint, ruído e diferenças consecutivas.

No Passo B, o ESP32 programou o AD5693R e a B2902A mediu diretamente VOUT em relação ao GND da breakout Adafruit. Cinco janelas de códigos adjacentes foram usadas para DNL local e um par global crescente-decrescente, com 1.025 pontos por direção e passo de 64 códigos, avaliou ganho e não linearidade aparente. Aquisições interrompidas foram preservadas, mas excluídas das métricas finais por critério definido antes do cálculo.

No Passo C rápido, VOUT da breakout AD5693R foi ligado ao módulo ADS1115 e todos os 65.536 códigos do DAC foram percorridos. No Passo C com SMU, a B2902A foi conectada ao nó analógico para comparar relações DAC-SMU e ADC-SMU e avaliar consistência cruzada. Dados brutos, scripts, hashes e resultados derivados foram preservados. As métricas são apresentadas como propriedades observadas das cadeias

experimentais; não foi produzido orçamento completo de incerteza nem declaração de calibração ou conformidade formal.

Resultados e Discussões

O sistema principal atingiu integração funcional entre aquisição local, interface gráfica, comunicação, persistência e visualização. O boot confirmou a inicialização do TFT, DS18B20, I2C, AD5693R e ADS1115 antes da dependência de serviços remotos. A interface local apresentou temperatura, AIN1, estado de Wi-Fi/MQTT, hora civil quando sincronizada e indicação de NTP. A estrutura do firmware manteve aquisição e display operacionais durante indisponibilidades temporárias do broker, demonstrando que a rede não funciona como pré-condição para a instrumentação local.

A validação integrada congelada em 11/08/2026 contém 740 snapshots MQTT v2 do mesmo dispositivo e boot, com sequências de 37 a 777 e duração de 757,3 s. Todos os 740 registros possuem temperatura válida; 737 possuem AIN1 válido. Três sequências registraram AIN1 habilitado, inválido e stale, com valor null. Esse caso é importante porque comprova que o contrato de dados não converte indisponibilidade em 0 V. A tabela histórica temperaturas, com 8.599 registros de versões anteriores, foi preservada sem migração silenciosa, enquanto o pipeline atual utiliza measurements_v2.

O ADS1115 permaneceu configurado em 64 SPS. A taxa efetiva média observada no baseline foi 49,7355 amostras/s, evidenciando a diferença entre a taxa configurada do conversor e a taxa real de atualização do sistema. O display operou aproximadamente a 4 Hz e a telemetria a 1 Hz, consumindo o último estado coerente em vez de criar filas longas de amostras destinadas apenas à visualização. Essa separação evitou acoplamento entre aquisição, interface e rede.

Foi observada uma lacuna interna entre as sequências 403 e 405. Como sequence é incrementada no preparo do snapshot, a ausência comprova que um snapshot não chegou à base preservada, mas não identifica isoladamente se a perda ocorreu antes do envio, no cliente, na rede, no broker ou no receptor. Retransmissões duplicadas decorrentes do QoS 1 também foram observadas e rejeitadas pelo logger usando a chave (device_id, boot_id, sequence), sem duplicar linhas no SQLite.

Durante a integração inicial do MQTT v2, a primeira publicação revelou estouro de pilha na task principal. O problema foi associado a um buffer de payload de 2.048 bytes alocado na pilha e corrigido por armazenamento estático. Após a correção, o menor espaço livre observado na pilha foi de 1.272 bytes, sem recorrência do panic durante a execução acompanhada. Esse resultado mostra a importância de validar não apenas o fluxo nominal, mas também os recursos internos do firmware.

A interface local e o dashboard foram registrados visualmente em operação. O dashboard apresentou temperatura, AIN1, estado ONLINE, validade, sequência/boot e históricos temporais. Os valores instantâneos de AIN1 mostrados nessas capturas documentam a interface e a telemetria, mas não são utilizados como resultados

metrológicos do DAC; a análise elétrica é baseada nas campanhas dedicadas descritas a seguir. O broker público HiveMQ e o servidor Dash de desenvolvimento foram adequados à prototipagem, mas não são apresentados como infraestrutura de produção.

Na caracterização do módulo baseado no ADS1115 (Passo A), foram aplicados 20.000 setpoints entre 0 e 2,5 V. O conjunto final possui 20.000 descartes e 200.000 leituras válidas, totalizando 220.000 conversões, sem erros ou novas tentativas. A regressão resultou em ganho normalizado de 0,999721836386, equivalente a erro de ganho aparente de -0,027816% (-278,164 ppm), intercepto de 0,137493 mV e R^2 de 0,999999993746. A INL pela reta de melhor ajuste variou de -1,623615 a +1,810036 LSB, com módulo máximo de 1,810036 LSB. Pela definição endpoint, o intervalo foi de -2,486443 a +0,915683 LSB, módulo máximo de 2,486443 LSB. O ruído agrupado foi 0,776229 LSB RMS, equivalente a aproximadamente 97,0 µV, e a dispersão média das médias de dez leituras foi 0,245465 LSB. Os resíduos mostraram curvatura sistemática, com comportamento aproximadamente em U. Como a rampa não determina diretamente todos os níveis de transição, esses dados não foram usados para declarar DNL formal, monotonicidade ou ENOB por SINAD do módulo ou do CI ADS1115.

No Passo B, cinco janelas consecutivas da breakout Adafruit baseada no AD5693R totalizaram 5.120 transições adjacentes. A DNL observada nessas regiões ficou entre -0,636 e +0,764 LSB, sem incremento nulo ou negativo. Quatro transições inicialmente extremas foram repetidas vinte vezes e não reproduziram os extremos originais, indicando sensibilidade a condições de montagem/medição e justificando cautela na interpretação de eventos isolados. O par global crescente-decrescente, com 1.025 pontos por direção e passo de 64 códigos, apresentou erro de ganho best-fit aparente de +0,0462% e erro de fundo de escala de +0,0445% do FSR. A não linearidade global aparente pelo método de extremos ficou entre -1,18 e +9,64 LSB. Como essa varredura global não percorre transições adjacentes, ela não estabelece DNL global nem ausência de missing codes em toda a escala.

A conexão analógica do Passo B foi refinada ao longo da campanha. A configuração final colocou as ponteiras da SMU diretamente em VOUT e GND da breakout Adafruit baseada no AD5693R, removendo protoboard e jumpers do caminho de medição. Esse procedimento reduziu instabilidade de contato e passou a ser a referência para repetibilidade. Aquisições interrompidas ou realizadas em estados reconhecidamente inadequados foram preservadas para rastreabilidade, porém não incorporadas às métricas finais.

A comparação com a documentação do AD5693R ajuda a delimitar a interpretação. O erro de ganho best-fit de +0,0462% permaneceu dentro do limite nominal de ±0,05% do FSR e o erro de fundo de escala de +0,0445% permaneceu dentro de ±0,075% do FSR. Nas 5.120 transições adjacentes efetivamente ensaiadas, a DNL também permaneceu dentro de ±1 LSB. Esses limites são os especificados para o AD5693R na documentação do componente (ANALOG DEVICES, 2024). Em contraste, a não linearidade aparente por extremos alcançou +9,64 LSB, acima do limite nominal de ±3 LSB especificado no datasheet para a variante B-grade. Esse valor não foi usado para declarar não conformidade do DAC: no range de 20 V, a B2902A possui exatidão especificada de ±(0,015% da leitura + 5 mV) (KEYSIGHT TECHNOLOGIES, 2020), enquanto três LSB do DAC correspondem a aproximadamente 114,44 µV. A resolução de leitura do instrumento, portanto, não deve ser confundida com sua exatidão absoluta.

Sem calibração rastreável recente, controle ambiental e orçamento formal de incerteza, a curvatura observada pertence à cadeia de medição e não pode ser atribuída integralmente à breakout ou ao CI AD5693R.

No Passo C rápido, a cadeia AD5693R-ADS1115 foi percorrida em todos os 65.536 códigos do DAC. O ganho aparente da cadeia apresentou erro de +139,585 ppm e resíduo RMS de 0,358 LSB do ADC. Dois códigos do ADC, 10800 e 15642, inicialmente tratados como suspeitos, foram observados em todos os 30 ciclos dirigidos, mostrando que sua ocorrência era reprodutível na condição ensaiada. Reversões unitárias observadas na cadeia não foram interpretadas como prova de não monotonicidade do DAC, pois a medida combina DAC, ADC, ruído e quantização.

O Passo C com SMU permitiu comparar referências selecionadas em estados temporais específicos da montagem. Na relação DAC-SMU escolhida, o erro de ganho aparente foi +408,441 ppm e o resíduo RMS 28,940 µV. Na relação ADC-SMU selecionada, o erro de ganho foi -753,241 ppm, com offset da relação de -2,742 mV e divergência direcional RMS de 583,982 µV entre trechos crescente e decrescente. Essas diferenças indicam que a montagem e o estado temporal contribuíam para a resposta observada e impedem atribuir integralmente os desvios a um único componente.

Uma verificação cruzada foi obtida combinando o ganho medido no Passo A com o ganho da referência DAC-SMU do Passo C. O produto previu o ganho do Passo C rápido com diferença de apenas 9,421 ppm. A proximidade demonstra consistência interna entre campanhas independentes em estrutura, mas não independência metrológica completa, pois a mesma B2902A participa de mais de uma referência.

A interpretação final distingue integração funcional, caracterização estática e calibração. O sistema principal demonstrou aquisição, apresentação local, telemetria versionada, persistência e visualização com tratamento explícito de validade e reinicializações. As campanhas A, B e C forneceram dados quantitativos de ganho, offset, linearidade, ruído e consistência da cadeia. Entretanto, não foi produzido orçamento completo de incerteza, não há certificado de calibração utilizado para atribuição rastreável dos erros e a operação da B2902A no range de 20 V limita afirmações absolutas em escala de poucos LSB. O ENOB dinâmico por SINAD não foi medido. A comparação quantitativa do DS18B20 com referência externa não foi realizada nesta etapa; as leituras atuais sustentam funcionamento e estabilidade observada, não uma declaração independente de exatidão do sensor.

Conclusão

O trabalho resultou em uma plataforma embarcada funcional para aquisição, exibição local e monitoramento remoto, alinhada ao plano PIBIC e ampliada para aquisição de tensão e experimentos de instrumentação. O sistema integra ESP32, sonda DS18B20, TFT, módulo ADS1115 e breakout AD5693R, com firmware FreeRTOS, comunicação Wi-Fi/MQTT, aplicação Python, armazenamento SQLite e dashboard Dash/Plotly. A arquitetura prioriza operação local independente da rede, diferencia valor válido de dado

ausente ou desatualizado e preserva identidade de boot e sequência para auditoria da telemetria.

A validação integrada preservou 740 snapshots em 757,3 s, com 740 temperaturas válidas e 737 leituras válidas de AIN1. Três ocorrências stale foram representadas corretamente como nulas. O ADS1115, configurado em 64 SPS, apresentou taxa efetiva média de 49,7355 amostras/s. O logger deduplicou retransmissões de QoS 1 e o pipeline manteve os 8.599 registros históricos separados da tabela measurements_v2. Um estouro de pilha identificado durante a integração MQTT foi corrigido, e a execução posterior acompanhada manteve margem mínima observada de 1.272 bytes.

As caracterizações complementares também foram concluídas nos escopos definidos. No Passo A, 220.000 conversões do módulo baseado no ADS1115 resultaram em erro de ganho aparente de -0,027816%, INL best-fit máxima de 1,810036 LSB e ruído de 0,776229 LSB RMS. No Passo B, 5.120 transições adjacentes da breakout Adafruit baseada no AD5693R apresentaram DNL de -0,636 a +0,764 LSB, sem incrementos nulos ou negativos nessas janelas. O Passo C rápido percorreu os 65.536 códigos do DAC e apresentou erro de ganho aparente de +139,585 ppm e resíduo RMS de 0,358 LSB do ADC. A comparação com SMU e a validação cruzada mostraram consistência interna entre campanhas e também sensibilidade a estado temporal e montagem.

Os resultados não constituem calibração rastreável nem prova formal de conformidade dos componentes. Permanecem como limitações a ausência de orçamento completo de incerteza, a restrição metrológica da B2902A no range utilizado, a ausência de ENOB por SINAD e, para o sensor de temperatura, a falta de comparação quantitativa independente com uma referência externa. Também permanecem como possibilidades de aprofundamento ensaios controlados de falha/reconexão de rede e a caracterização do consumo elétrico.

Em síntese, o projeto demonstrou uma arquitetura documentada de instrumentação conectada, combinando aquisição local, interface, telemetria, armazenamento, visualização e caracterização elétrica complementar. A documentação preserva dados brutos, scripts e limitações de interpretação, permitindo auditoria das principais conclusões e fornecendo base para expansões futuras, incluindo atuação segura do DAC e interfaceamento com sensores termorresistivos.

Referências

ANALOG DEVICES. DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. 2019. Disponível em: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf. Acesso em: 23 jul. 2026.

ANALOG DEVICES. AD5693R/AD5692R/AD5691R/AD5693: Tiny 16-/14-/12-Bit I2C nanoDAC+ with 2 ppm/°C Reference. Rev. E, 2024. Disponível em: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5693r_5692r_5691r_5693.pdf. Acesso em: 3 ago. 2026.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Series Datasheet. Version 5.2, 2025. Disponível em: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 23 jul. 2026.

GUITION. 2.8 inch ESP32 module JC2432W328N/R/C. Especificação do fabricante, s.d. Acesso em: 13 ago. 2026.

AGILENT TECHNOLOGIES. B2900 Series Precision Source/Measure Unit User's Guide. Edition 2. B2910-90010, 2011.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. B2900A Series Precision Source/Measure Unit: Data Sheet. 5990-7009EN, 2020.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. B2900 Series Source/Measure Unit SCPI Command Reference. Edition 8, B2910-90030, 2019.

OASIS. MQTT Version 5.0. 2019. Disponível em: https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html. Acesso em: 23 jul. 2026.

TEXAS INSTRUMENTS. ADS1113, ADS1114, ADS1115: Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs with Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator. Rev. E, 2024. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf. Acesso em: 23 jul. 2026.

Anexos



Figura 1: Arquitetura consolidada do sistema embarcado, incluindo DS18B20, ADS1115, AD5693R com retorno analógico de VOUT para AIN1, ESP32/FreeRTOS,

display, Wi-Fi/MQTT, logger Python, SQLite e dashboard. Fonte: elaboração própria (2026).

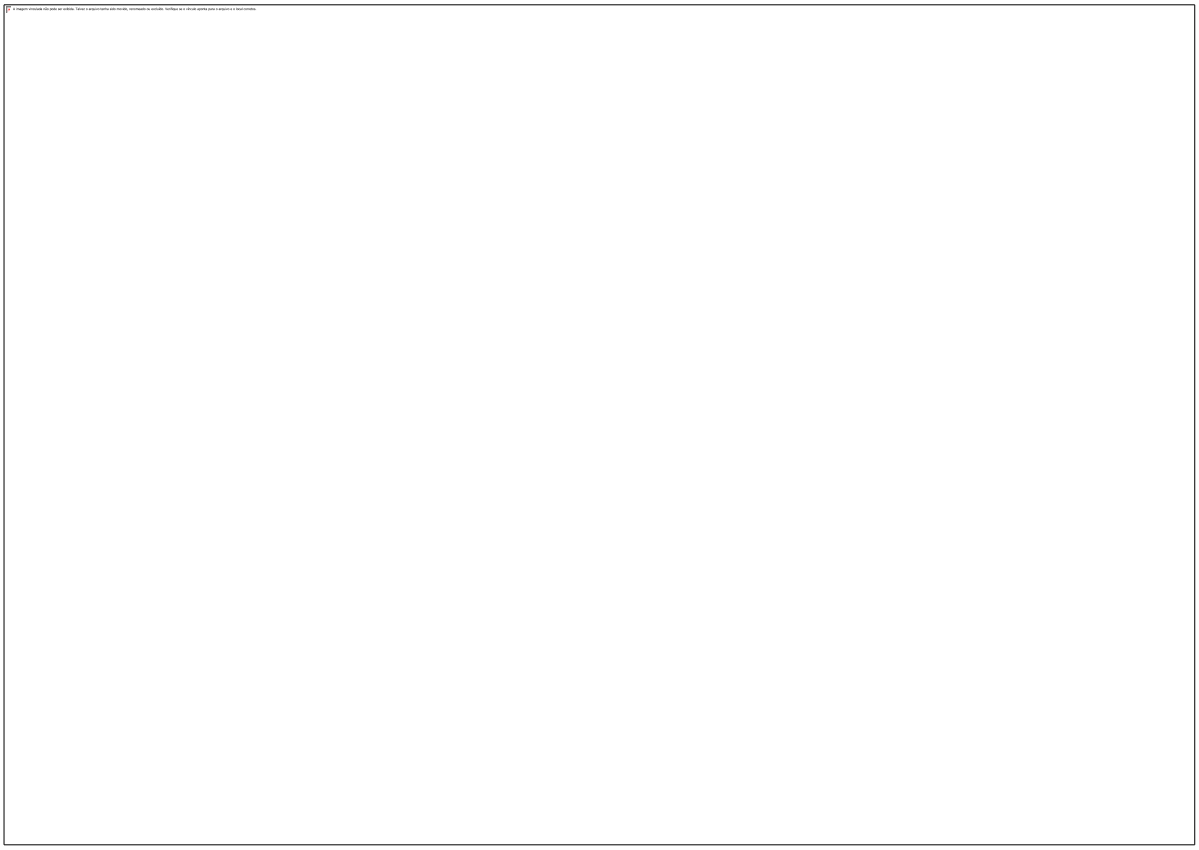


Figura 2: Interconexões elétricas externas entre a Guition JC2432W328, a sonda DS18B20, o módulo ADS1115 e a breakout Adafruit AD5693R. O diagrama não representa os circuitos internos dos módulos. Fonte: elaboração própria (2026).

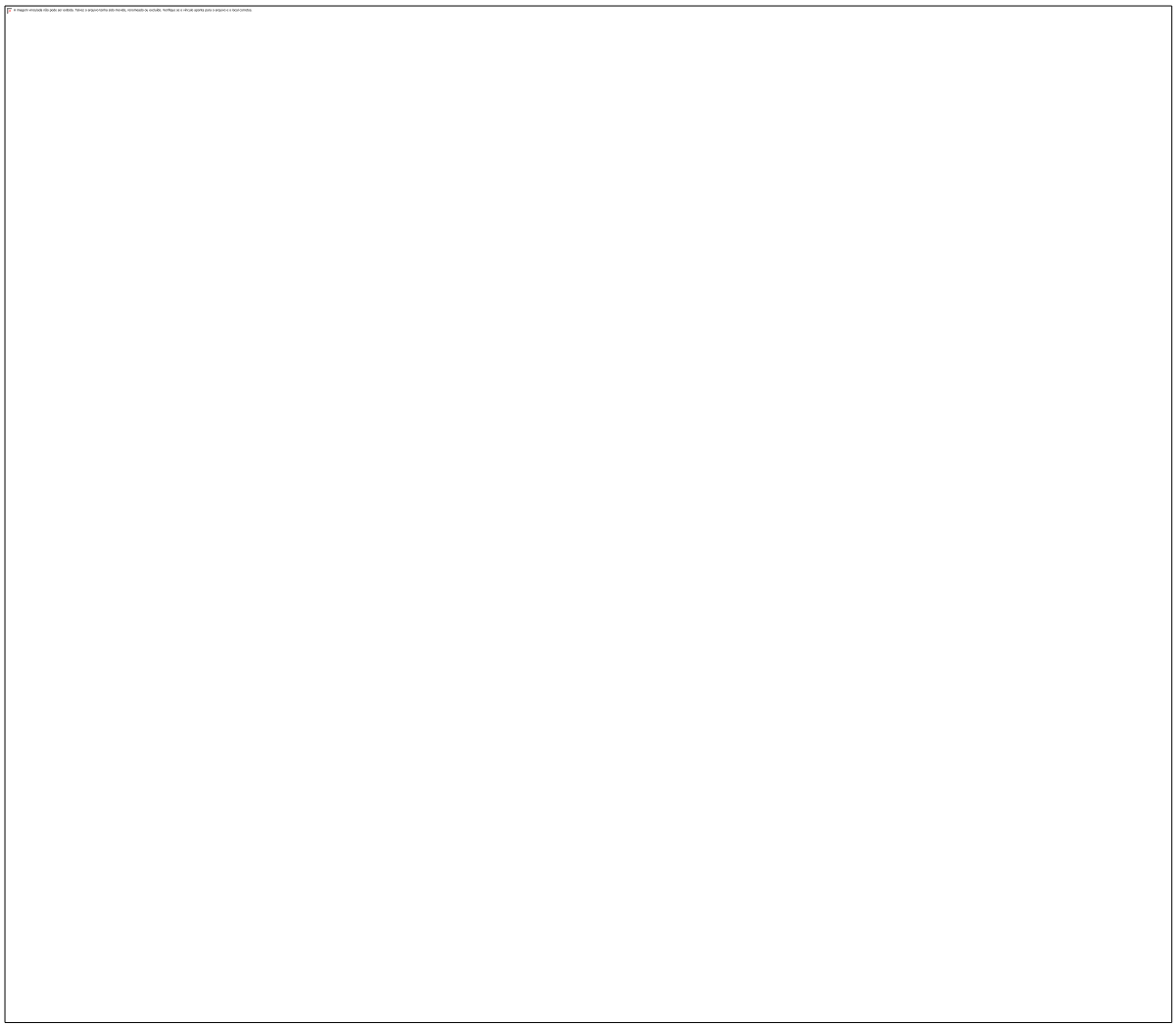


Figura 3: Montagem experimental do sistema principal em bancada, incluindo a placa Guition JC2432W328, a sonda DS18B20, o módulo ADS1115, a breakout Adafruit AD5693R e o cabeamento em protoboard. Fonte: acervo da pesquisa (2026).

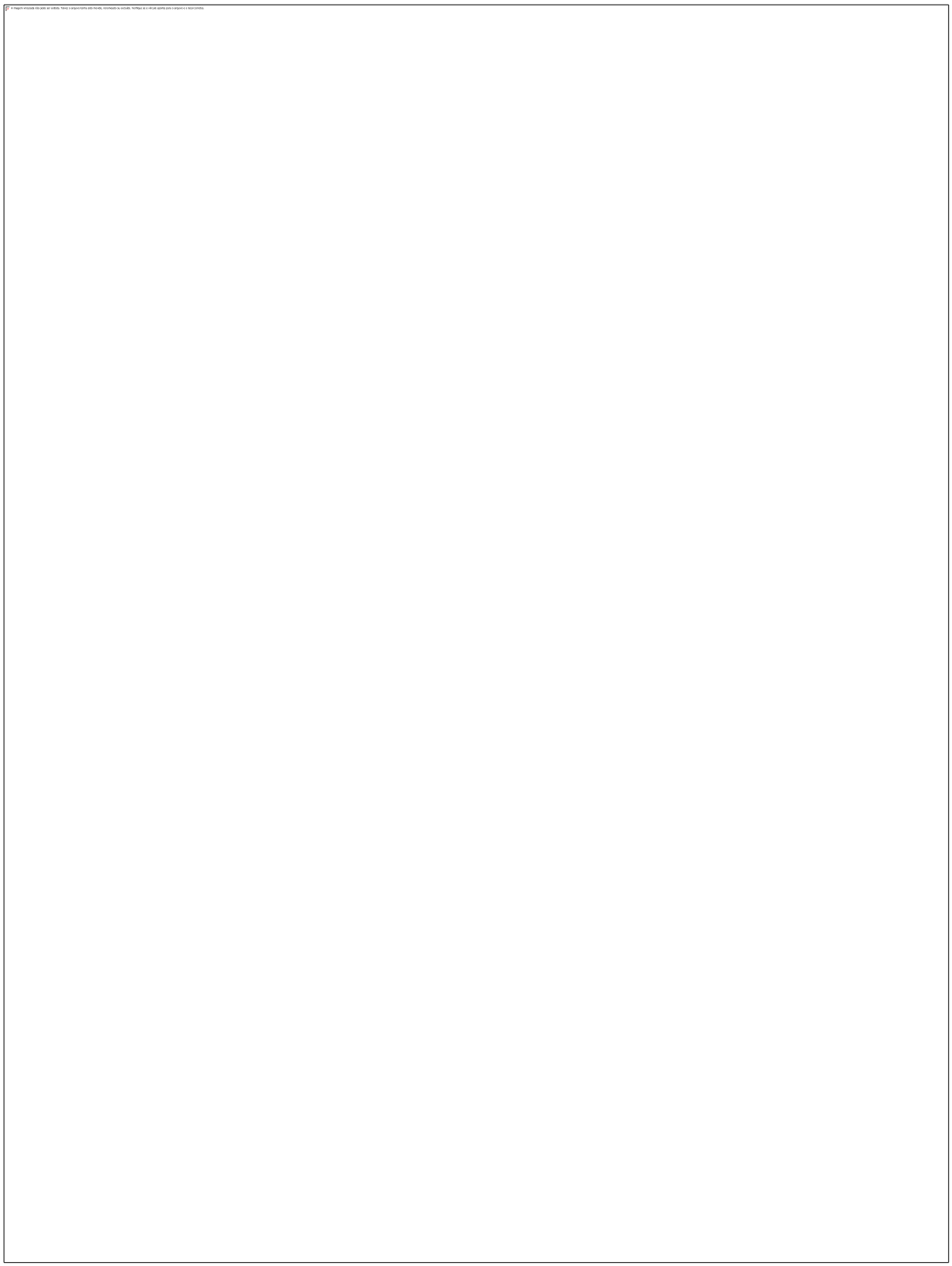


Figura 4: Interface local em operação, exibindo temperatura, AIN1, Wi-Fi/MQTT, hora e estado NTP. O valor de AIN1 serve apenas para ilustrar a interface e não é utilizado como resultado metrológico do DAC. Fonte: acervo da pesquisa (2026).



Figura 5: Dashboard v2 com temperatura, AIN1, estado do sistema e históricos da telemetria MQTT v2. Os identificadores únicos do dispositivo foram mascarados para divulgação pública. Fonte: elaboração própria (2026).

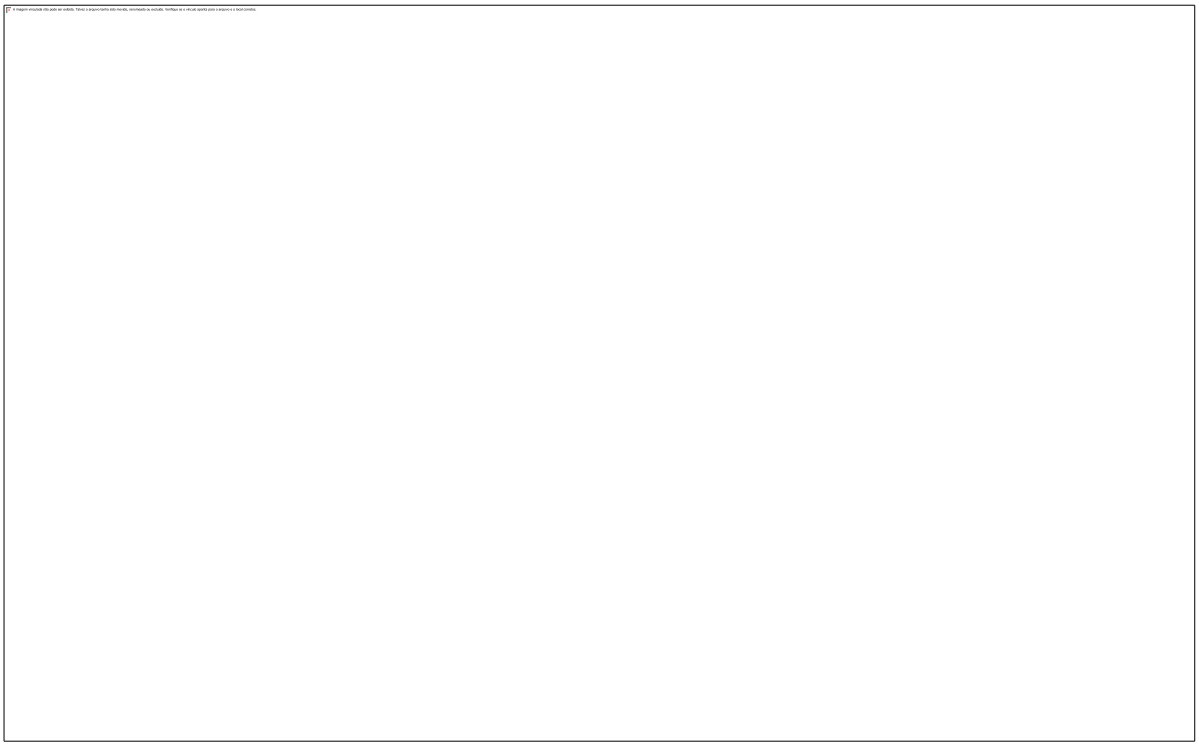


Figura 6: INL best-fit calculada na caracterização final do módulo baseado no ADS1115, com 20.000 setpoints entre 0 e 2,5 V. Fonte: dados da pesquisa (2026).

CÓDIGO: ET0344

AUTOR: LETICIA FERNANDES GOMES

COAUTOR: MATHEUS MEDEIROS SIMOES BARBOSA

ORIENTADOR: NATHALIA SARAIVA RIOS

TÍTULO: Imobilização de proteases em sílica nanoestruturada do tipo SBA-15

Resumo

A imobilização em suportes mesoporosos pode aumentar a estabilidade e reutilização enzimática. Este trabalho avaliou a imobilização das proteases de Bacillus amyloliquefaciens (PBA) e Bacillus licheniformis (PBL) para hidrólise do soro de leite. A atividade foi medida com azocaseína 0,5% (m/v) e a concentração proteica por BSA. Suportes foram sintetizados por método hidrotérmico, testando pré e pós-ativação com p-benzoquinona. A estabilidade foi testada a 50 °C (tampão fosfato de sódio 10 mM, pH 7,0) e sua aplicação pelo grau de hidrólise do soro de leite. Para B. amyloliquefaciens (22175 U/mL de atividade; 14 mg/mL de concentração), a imobilização ideal foi em tampão de carbonato de sódio 10 mM (pH 9,0). Para B. licheniformis (11116,665 U/mL; 19,54 m/mL), o ideal foi em tampão glicina-NaOH 10 mM (pH 9,5). A concentração de 0,05% (m/v) de p-benzoquinona teve os melhores resultados, sendo a pré-ativação selecionada para os ensaios posteriores. A modificação com do suporte com Trimetilbenzeno (TMB) e a pré-ativação aumentaram a atividade das proteases. No hidrólise do soro, B. amyloliquefaciens teve maiores rendimentos na forma solúvel, Conclui-se que a imobilização em suportes mesoporosos funcionalizados gera biocatalisadores mais estáveis e ativos.

Palavras-chave: Imobilização. Proteases. Suportes mesoporosos. Soro do leite.

TITLE: Immobilization of proteases on SBA-15 type nanostructured silica

Abstract

Immobilization on mesoporous supports can enhance enzyme stability and reusability. This study evaluated the immobilization of proteases from Bacillus amyloliquefaciens (PBA) and Bacillus licheniformis (PBL) for whey hydrolysis. Activity was measured using 0.5% (w/v) azocasein, and protein concentration was determined via the BSA method. Supports were synthesized using a hydrothermal method, testing both pre- and post-activation with p-benzoquinone. Stability was assessed at 50 °C (10 mM sodium phosphate buffer, pH 7.0), and performance was evaluated based on the degree of whey hydrolysis. For B. amyloliquefaciens (22,175 U/mL activity; 14 mg/mL concentration),

optimal immobilization occurred in 10 mM sodium carbonate buffer (pH 9.0). For *B. licheniformis* (11,116.665 U/mL; 19.54 mg/mL), the optimal condition was 10 mM glycine-NaOH buffer (pH 9.5). A p-benzoquinone concentration of 0.05% (w/v) yielded the best results, and pre-activation was selected for subsequent assays. Modification of the support with trimethylbenzene (TMB) and pre-activation enhanced protease activity. Regarding whey hydrolysis, B. amyloliquefaciens showed higher yields in its soluble form; however, the study concludes that immobilization on functionalized mesoporous supports produces effective and active biocatalysts.

Keywords: Immobilization. Proteases. Mesoporous supports. Whey.

Introdução

As enzimas são biocatalisadores naturais altamente eficientes, capazes de acelerar reações químicas complexas em sistemas biológicos e em processos industriais (Pinheiro et al., 2019). Além de ser um exemplo de química verde, apresenta como característica de maior interesse a sua elevada especificidade (Souza et al., 2017), sendo a forma como ocorre essa atividade determinada pelo tipo da enzima. Um exemplo desses biocatalisadores são as proteases, as quais têm a função vital de quebrar as ligações peptídicas entre os aminoácidos das proteínas (Millán, 2021).

As proteases representam cerca de 60% do mercado global de enzimas, sendo amplamente utilizadas em setores desde a fabricação de detergentes até a produção de alimentos funcionais, como nos produtos derivados do leite (Pinheiro et al., 2019). No entanto, mesmo operando uma variedade de funções, contêm o problema crítico chamado de autólise. A autólise é justamente quando as proteases, em vez de digerir somente as proteínas, acabam hidrolisando umas às outras (Yiu; Wright; Botting, 2001). Para isso ser evitado, foram criados diversos quadros de estratégias, sendo uma delas a imobilização dessas enzimas em suportes porosos.

A imobilização enzimática consiste em confinar uma enzima em uma região para transformá-la em um biocatalisador heterogêneo. Enquanto as enzimas na forma natural são mais solúveis e difíceis de recuperar, a imobilização permite que as enzimas continuem operando longe do meio reacional, tornando possível que sejam reutilizadas em diversos ciclos e sendo mais economicamente viável e sustentável (Souza et al., 2017).

O SBA-15 se destaca entre os demais materiais porosos por apresentar poros largos e ajustáveis, paredes espessas e alta área superficial interna (Santos et al., 2016). Ou seja, apresentam características ideais para conseguir adsorver a enzima, permitindo que essa realize a sua atividade de maneira mais estável e de forma que evite possíveis chances de autólise. Em alguns casos, para facilitar a imobilização de moléculas mais volumosas, como no caso de determinados tipos de proteases, são acrescentados agentes expansores. Tal acréscimo permite que o diâmetro dos poros aumente e facilite o acesso ao sítio ativo da enzima, sem ter problemas de difusão (Santos et al., 2016).

Portanto, a presente pesquisa buscará testar a técnica da imobilização em proteases dos tipos Bacillus amyloliquefaciens e Bacillus licheniformis em diferentes suportes de SBA-15 modificados com fluoreto de amônio (F) e modificados com trimetilbenzeno

(TMB). Por meio desses resultados, será escolhida a melhor condição para ser testada a eficiência dessa enzima imobilizada no soro do leite.

Metodologia

2.1. ENZIMAS

As enzimas utilizadas foram protease de Bacillus licheniformis e protease de Bacillus amyloliquefaciens, sendo fornecidas pela Sigma-aldrich.

2.2. MEDIDAS DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA

Atividade proteolítica foi baseada na metodologia exposta por Charney; Tomarelli (1947). Foi usado cerca de 0,5% de azocaseína (p/v) em 50 mM de acetato de sódio tampão (pH 5,0), com incubação a 32°C por 40 minutos. A reação foi interrompida com 15% de de ácido tricloroacético (v/v), seguida por centrifugação (3000 rpm, 15 minutos) e leitura de absorvância a 428 nm após adição de KOH 5N.

2.3. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DAS PROTEÍNAS

A concentração da proteína baseou-se na metodologia escrita por Bradford (1976), sendo um critério utilizado antes e após o processo de imobilização. Os devidos resultados foram representados em uma curva de calibração, tendo como base a proteína do soro bovino (BSA).

2.4. SÍNTESE DO SUPORTE

No experimento, foram realizados a síntese de dois tipos de sílicas mesoporosas do tipo SBA-15: a modificada com flureto de amônio (F) e a modificada com trimetilbenzeno (TMB). A diferença entre as duas foi dada pelo tamanho dos poros (Dp é menor ou igual a 8 nm) e a modificada com diâmetro mais largo (Dp é maior que 8 nm). A síntese foi realizada de acordo com Cipolatti et al. (2023), utilizando Prônico P123, HCl, NH_4F e TEOS, seguido por tratamento hidrotermal (100°C) e calcinação (550°C). Para o material modificado com trimetilbenzeno (TMB), 4,54g de TMB foram adicionados durante a síntese, após a dissolução dos 0,0524g de NH_4F.

2.5. IMOBILIZAÇÃO

A imobilização foi realizada colocando 0,2 g de suporte SBA-15-F ou SBA-15-F- TMB em contato com 10 mL da solução enzimática no tampão específico para cada enzima: tampão glicina- NaOH (pH 9,5), no caso da protease de Bacillus licheniformis; tampão carbonato de sódio (pH 9,0), para a protease de Bacillus amyloliquefaciens.

Posteriormente, foram levadas essas soluções para agitação (150 rpm) a 4°C (carga enzimática de 1mg/g). Ao longo de 48 horas, taxas de sobrenadante foram coletadas como forma de monitorar a atividade residual, até obter um rendimento acima de 80% de imobilização. Após esse momento, os suportes eram filtrados, lavados e armazenados sob refrigeração. A atividade final da imobilização foi determinada conforme o protocolo descrito na seção 2.2

2.6. PRÉ- ATIVAÇÃO E PÓS ATIVAÇÃO NO SUPORTE

A pré e pós-ativação foram realizadas com p-benzoquinona, visando favorecer a formação de ligações covalentes entre as enzimas e os suportes (Yiu; Wright; Botting, 2001). Na pré-ativação, uma solução de 0,5% (m/v) p-benzoquinona em etanol 20% (v/v) foi colocada em contato com os suportes SBA-15-F e SBA-15-F-TMB, sob agitação de 24 rpm por 1 hora. Em seguida, os materiais foram filtrados a vácuo com água destilada até completa secagem. Para a pós-ativação, 0,2 g do imobilizado foi posto em contato com uma solução de p-benzoquinona em tampão fosfato de sódio 200 mM (pH 7,0), sob as mesmas condições de agitação e tempo, sendo posteriormente filtrado com o mesmo tampão. Ambos os procedimentos foram realizados usando concentrações de 0,05%, 0,1% e 0,5% (m/v) de p-benzoquinona.

2.7. HIDRÓLISE DO LEITE

A hidrólise do leite se baseou na metodologia de Bezawada et al. (2010). O soro do leite fresco, proveniente do setor de lacticínios da Escola Agrícola de Jundiaí (EAJ), serviu como substrato para a hidrólise. O soro foi pasteurizado a 65°C por 20 minutos e, após o resfriamento até 50°C, ajustou-se o pH para 7,0 com tampão NaOH 0,2N. A hidrólise enzimática da proteína do soro usou, inicialmente, a protease Bacillus licheniformis na forma solúvel. Adicionaram-se 0,05%, 0,1% e 0,5% da enzima no soro, incubando-se a 50 °C em banho-maria por 30 minutos. Após esse período, o pH foi reajustado para 7,0 com NaOH 0,2 N, registrando o volume de base necessário para essa correção. Em seguida, como forma de inativar as enzimas e interromper a hidrólise, 1

mL do hidrolisado foi submetido a aquecimento a 85°C por 7 minutos. Posteriormente, as amostras foram resfriadas e armazenadas a -20°C para futuras análises.

Para a enzima solúvel Bacillus amyloliquefaciens, realizou-se o mesmo procedimento. O grau de hidrólise foi determinado pela Equação 1, tendo como referência a metodologia de Adler-Nissen (1986).

$$Grau\ de\ hidrólise\ \%\ (GH\ \%) = B\ x\ Nb\ x\ 1\alpha\ x\ 1MP\ x\ 1htot\ x\ 100 \quad \text{(Equação 1)}$$

onde, B, consumo de NaOH 0,2 N em mL; Nb, normalidade da base (0,2 N); α, grau médio de dissociação dos grupos α-$NH2$; MP, massa total de proteína no hidrolisado em g; $htot$, número total de ligações peptídicas no substrato proteico.

Resultados e Discussões

CARACTERIZAÇÃO DAS PROTEASES

Para evitar possíveis eventos de autocatálise, as enzimas foram previamente diluídas antes da imobilização, sendo a diluição de 5000 selecionada como a faixa ótima de atividade. Nessa faixa de diluição, foi encontrado um valor de 11116,665 U/mL de atividade enzimática para a protease Bacillus licheniformis e 22175 U/mL para Bacillus amyloliquefaciens.

Em um estudo com Bacillus licheniformis parcialmente purificadas, foram encontradas atividades na faixa de 7000-15000 U/mL (Sarker et al., 2013). Já em um trabalho sobre a enzima Bacillus amyloliquefaciens derivada da fermentação da pasta de soja (Rajarajapazham et al., 2021) foi verificada uma produção máxima de 3.712–3.940 U/mL. Ou seja, os biocatalisadores na forma solúvel apresentaram uma eficiência catalítica igual ou até mesmo superior à exposta por outros pesquisadores, sendo enfatizada a eficácia das etapas usadas no atual trabalho.

Outrossim, como forma de se obter os valores da carga proteica, foi realizado o ensaio em várias faixas de diluição com o tampão acetato de sódio 50 mM, sendo posteriormente moldada uma curva (Figuras 1 e 2) para melhor estudo.

A Bacillus amyloliquefaciens teve a sua concentração estabilizada na faixa de 120-160, enquanto a protease Bacillus licheniformis ficou na faixa 250- 300 de diluição. A média dessas faixas resultou em concentrações proteicas de 14 mg/mL e 19,54 m/mL, respectivamente. Como proteases purificadas ou concentradas costumam variar entre 10 e 30 mg/mL, podendo ultrapassar 50 mg/mL em formulações industriais (Emran et al., 2020; Sarker et al., 2013; Guleria et al., 2016; Sigma-Aldrich, 2024), as taxas encontradas no presente estudo foram consideradas positivas, validando o preparo das enzimas para as etapas posteriores de imobilização.

SÍNTESE DO SUPORTE SBA-15 MODIFICADO E ATIVADO

A principal diferença encontrada entre o suporte SBA-15-F e SBA-15-F modificado por trimetilbenzeno (TMB), foi na textura. O primeiro, apresentou uma massa mais endurecida e menos granulosa, enquanto o segundo teve uma textura mais macia e granulada (Figura 3). Essa característica era de ser esperada, principalmente, devido à presença do TMB, que garante uma estrutura mais friável, menos densa e com morfologia globular (Santos et al., 2016). Assim, a textura foi uma prova de que a síntese de ambos os suportes ocorreu de maneira correta.

Na última síntese, foi obtido cerca de 2,2582g de suporte SBA-15 modificado por TMB e 1,04742g de suporte SBA-15-F.

Ademais, a síntese dos suportes pré-ativados com p-benzoquinona garantiu um pó ainda mais hidrofílico e com peso maior do que o encontrado na produção do SBA-15-F e SBA-15-F-TMB. Um dos motivos para tais comportamentos, foi devido à p-benzoquinona incorporar fisicamente e quimicamente novas moléculas à estrutura original da sílica. Essas moléculas possuem peso molecular próprio e são em grande parte reativas e polares (Yiu; Wright; Botting, 2001), justificando dessa forma, a alta higroscopicidade e maior massa final medida.

IMOBILIZAÇÃO ENZIMÁTICA COM ATIVAÇÕES

Para aumentar os valores das atividades do imobilizado, sucederam-se ativações com p-benzoquinona nos SBA-15-F e SBA-15-F com trimetilbenzeno (TMB), sendo os resultados expostos nas Tabelas 1 e 2. Esse agente funcionalizante introduz grupos reativos nos suportes, permitindo a formação de ligações covalentes mais estáveis entre a enzima e o material, o que favorece sua retenção e reduz perdas durante o processo de imobilização. (Souza et al., 2017).

A pré-ativação gerou atividades superiores às dos biocatalisadores não ativados para

ambas as proteases. Para Bacillus amyloliquefaciens, a melhor atividade foi na concentração de 0,05% (m/v) p-benzoquinona com valor de 71,30 ± 3,71 U/g (atividade relativa de 247,94 ± 3,75 %) no SBA 15-F-BQ-PBA e de 75,67 ± 2,47 U/g (197,24 ± 6,44 %) no SBA 15-F-TMB-BQ-PBA. Assim, verificou-se que o aumento da concentração do agente não promoveu ganho proporcional de atividade, indicando que concentrações mais baixas preservam a conformação estrutural e a acessibilidade do sítio ativo ao substrato (Souza et al., 2017).

O mesmo comportamento foi observado para a Bacillus licheniformis, tendo as melhores taxas de atividade na concentração de 0,05 % (m/v) de p-benzoquinona com valor de 53,70 ± 2,47 U/g (210,52 ± 3,86 %) no SBA 15-F-BQ-PBL e de 57,07 ± 6,53 U/g (171,44 ± 0,26 %) no SBA 15-F-TMB-BQ-PBL. No entanto, diferentemente da protease B. amyloliquefaciens, nas demais concentrações a atividade permaneceu próxima à do sistema sem ativação.

Na pós-ativação, as enzimas foram adsorvidas antes do contato com o agente (Tabelas 3 e 4). Para B. amyloliquefaciens, os melhores resultados de atividade foram na concentração de 0,05% (m/v) de p-benzoquinona com valores de 14,63 ± 4,77 U/g (31,41 ± 10,03 %) no SBA 15-F-PBA-BQ e 17,11 ± 6,18 U/g (40,72 ± 10,75 %) no SBA 15-F-TMB-PBA-BQ. Porém, nas demais concentrações houve inativação total da atividade enzimática. Isso ocorre porque o excesso de p-benzoquinona pode induzir inativação química direta, lixiviação e distorção estrutural (Yiu; Wright; Botting, 2001; Santos et al.,2016; Souza et al., 2017).

Para a protease B. licheniformis, os melhores resultados foram quando a p-benzoquinona apresentou concentração de 0,05% (m/v), tendo atividade de 14,75 ± 1,06 U/g (72,33 ± 21,69 %) para SBA 15-F-PBL-BQ e 13,38 ± 2,30 U/g (38,68 ± 5,47 %) para SBA 15-F-TMB-PBL-BQ. Embora não tenha havido perda total da atividade, os valores foram inferiores aos do sem ativação.

Como a pós-ativação não favoreceu o ganho catalítico, a estratégia foi descartada. Dessa forma, selecionou-se a pré-ativação com 0,05% (m/v) de p-benzoquinona para ambas as proteases para os ensaios de determinação da carga proteica máxima e aplicação na hidrólise do soro de leite.

HIDRÓLISE NO SORO DO LEITE – APLICAÇÃO

Inicialmente, verificou-se que o sistema sob agitação apresentou o melhor desempenho hidrolítico, pois a movimentação favorece a transferência de massa e a frequência de colisões efetivas entre as enzimas e o substrato (Souza et al., 2019).

Para a protease solúvel de Bacillus amyloliquefaciens (Tabela 5), o grau de hidrólise cresceu com o aumento da concentração enzimática. Em 1,5 h de reação sob agitação, a concentração de 0,05% (v/v) alcançou 10,67 ± 1,08 %, enquanto a de 0,5% (v/v) atingiu 16,19 ± 2,69 %. Ademais, a concentração de 1,0% (v/v) apresentou os maiores valores de hidrólise, mas se estabilizou entre 1 h e 2 h.

No caso da protease Bacillus licheniformis (Tabela 6), os maiores graus de hidrólise foram em 1,5 h nas concentrações de 0,10% (v/v) e 0,5% (v/v), ambas atingindo 31,15 ± 0,94%. Diferentemente de B. amyloliquefaciens, o aumento da concentração enzimática para 1,0% (v/v) reduziu a taxa em 1,5 h de hidrólise (26,86 ± 0,51 %), demonstrando que o excesso de enzima nem sempre é proporcional a hidrólise, devido a limitação de substrato.

Na aplicação combinada das proteases no soro de leite (Tabela 7), a carga 0,25% (v/v) obteve seu máximo em 8 h (34,45 ± 0,68 %). %. Por outro lado, a carga de 0,5 % (v/v) superou esse resultado em apenas 0,5 h, atingindo o seu máximo de 61,56 ± 0,50 % em 8 h.

Assim, a concentração de 0,5% (v/v) foi selecionada como ideal para os biocatalisadores solúveis, confirmando que as enzimas combinadas geraram maior grau de hidrólise do que das formas isoladas.

Conclusão

Portanto, para a protease Bacillus amyloliquefaciens foram encontradas uma atividade enzimática de 22175 U/mL e concentração proteica de 14 mg/mL, com melhores condições de imobilização em tampão de carbonato de sódio 10 mM (pH 9,0), por 2 horas no suporte SBA 15-F e 1 hora no SBA 15-F-TMB. Para Bacillus licheniformis, a atividade enzimática foi de 11116,665 U/mL e concentração proteica de 19,54 m/mL, sendo as melhores condições de imobilização em tampão Glicina- NaOH 10mM (pH 9,5), por 2 horas tanto no SBA 15-F quanto no SBA 15-F-TMB.

O suporte SBA 15 com fluoreto apresentou textura mais granulosa e endurecida, enquanto a modificação com trimetilbenzeno (TMB) resultou em um material mais macio. A ativação do suporte com p-benzoquinona favoreceu o caráter hidrofílico do pó e contribuiu para o aumento da atividade catalítica das proteases imobilizadas. A

concentração de 0,05% (m/v) de p-benzoquinona obteve resultados mais satisfatórios tanto na pré-ativação quanto na pós-ativação. No entanto, a pré-ativação foi selecionada para os ensaios seguintes, devido à ocorrência de atividades nulas ou inferiores em alguns sistemas da pós-ativação.

De modo geral, a imobilização de proteases em suportes mesoporosos funcionalizados gerou biocatalisadores mais estáveis e ativos, mostrando-se promissora para a hidrólise do soro de leite, embora a eficiência varie conforme a protease e as condições aplicadas.

Referências

ADLER-NISSEN J. Uma revisão da hidrólise de proteínas alimentares – áreas específicas. Hidrólise enzimática de proteínas alimentares. Amsterdã: Elsevier; 1986. p. 56.

BEZAWADA, J.; YAN, S.; TYAGI, R. D.; SURAMPALLI, R. Y. Comparison of protease activities in different Bacillus licheniformis strains using wastewater sludge and synthetic soy medium as raw material. Environmental Technology, v. 31, n. 1, p. 63–72, 2010. DOI: 10.1080/09593330903338429. Disponível em: PubMed. Acesso em: 17 jul. 2026.

BRADFORD, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry, 72, 248–254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3

CHARNEY, J.; & TOMARELLI, R. M. (1947). A colorimetric method for the determination of the proteolytic activity of duodenal juice. The Journal of Biological Chemistry, 171(2), 501–505. https://doi.org/10.1016/s0021-9258(17)41059-3

CIPOLATTI, Eliane; RIOS, Nathália S.; RODRIGUES, Rafael C.; TARDIOLI, Paulo W.; BERENGUER-MURCIA, Ángel; ROCHA-MARTIN, Javier; FERNÁNDEZ-LAFUENTE, Roberto. Immobilization of enzymes on nanomaterials: necessity, opportunities, and drawbacks. In: Bionanocatalysis: From Design to Applications. [S. l.]: Elsevier, 2023. cap. 18, p. 1-32. DOI: 10.1016/B978-0-323-91760-5.00013-0.

EMRAN, Md. A. et al. Purification and characterization of a thermostable alkaline protease from Bacillus licheniformis isolated from hot spring environment in Bangladesh. Biotechnology Reports, v. 28, p. e00568, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1878818120304060 Acesso em: 21 jul. 2025.

GULERIA, S. et al. Immobilization of Bacillus amyloliquefaciens SP1 and its alkaline protease in various matrices for repeated use. 3 Biotech, v. 6, n. 2, p. 165, 2016. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5039138/ Acesso em: 21 jul. 2025.

KARIMI, Babak; EMADI, Saeed; SAFARI, Ali Asghar; KERMANIAN, Mehraneh. Immobilization, stability and enzymatic activity of albumin and trypsin adsorbed onto

nanostructured mesoporous SBA-15 with compatible pore sizes. RSC Advances, v. 4, n. 9, p. 4387-4394, 2014. DOI: https://doi.org/10.1039/c3ra46002a.

MILLÁN, Gersi Cristina Lunar. Peptídeos bioativos obtidos por hidrólise de proteína de soro de leite bovino mediada por proteases de Lysobacter sp. A03. 2021. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

PINHEIRO, Bruna B.; DOS SANTOS, Kimberle P.; RIOS, Nathalia S.; DE MACEDO, André Casimiro; DOS SANTOS, José C. S.; GONÇALVES, Luciana R. B. Enzymatic Reactions and Biocatalytic Processes. In: REEDIJK, J. (ed.). Elsevier Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering. Waltham, MA: Elsevier, 2019. p. 1-14. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14571-8.

RAJARAJAPAZHAM, J.; BENIT, N.; ALOTAIBI, S. S.; RATHI, M. A.; SRIGOPALRAM, S.; BIJI, G. D.; VIJAYARAGHAVAN, P. In vitro fibrinolytic activity of an enzyme purified from Bacillus amyloliquefaciens strain KJ10 isolated from soybean paste. Saudi Journal of Biological Sciences, v. 28, n. 8, p. 4117–4123, 2021.

SANTOS, Sandra M. L. et al. The effect of structure modifying agents in the SBA-15 for its application in the biomolecules adsorption. Microporous and Mesoporous Materials, [s. l.], v. 232, p. 53–64, set. 2016. DOI: 10.1016/j.micromeso.2016.06.004.

SARKER, P.K. et al. Optimization and partial characterization of protease production by Bacillus licheniformis P003 in submerged fermentation. Stamford Journal of Microbiology, v. 3, n. 1, p. 1–6, 2013. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3795880/ Acesso em: 21 jul. 2025.

SIGMA-ALDRICH. Protease, Subtilisin A from Bacillus licheniformis. [S.l.], 2024. Disponível em: https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/sigma/p5380 Acesso em: 21 jul. 2025.

SILVESTRE, Marialice P. C.; DA SILVA, Maitê C.; DE SOUZA, Mariana W. S.; SILVA, Viviane D. M.; DE AGUIAR, Marcos J. B.; SILVA, Mauro R. Hydrolysis degree, peptide profile and phenylalanine removal from whey protein concentrate hydrolysates obtained by various proteases. International Journal of Food Science & Technology, v. 48, n. 3, p. 588–595, 2013. DOI: 10.1111/ijfs.12003. Disponível em: Oxford Academic — artigo completo. Acesso em: 22 jul. 2026.

SILVESTRE, M. P. C.; MORAIS, H. A.; SILVA, V. D. M.; SILVA, M. R. Degree of hydrolysis and peptide profile of whey protein concentrate hydrolysates prepared with a Bacillus licheniformis protease. Publicatio UEPG: Ciências Biológicas e da Saúde, v. 18, n. 2, p. 73-81, 2012. DOI: 10.5212/Publ.Biologicas.v.18i2.0001.

SOUZA, Lívia Tereza de Andrade; VERÍSSIMO, Lizzy Ayra Alcântara; JOÃO, Benevides Costa Pessela; SANTORO, Marcelo Matos; RESENDE, Rodrigo R.; MENDES, Adriano A. Imobilização enzimática: princípios fundamentais e tipos de suporte. In: Biotecnologia Aplicada à Agro & Indústria. [S. l.: s. n.], 2017. cap. 15, p. 530-563.

SOUZA, Renata Silva Cabral de; TONON, Renata Valeriano; STEPHAN, Marilia Penteado; SILVA, Caroline Mellinger; PENTEADO, Ana Lúcia; CABRAL, Lourdes Maria Corrêa; KUROZAWA, Louise Emy. Avaliação do potencial antioxidante de proteínas do soro de leite concentradas por ultrafiltração e hidrolisadas por diferentes proteases comerciais. Brazilian Journal of Food Technology, Campinas, v. 22, e2018021, p. 1-11, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/1981-6723.02118.

YIU, Humphrey H. P.; WRIGHT, Paul A.; BOTTING, Nigel P. Enzyme immobilisation using SBA-15 mesoporous molecular sieves with functionalised surfaces. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, [s. l.], v. 15, n. 1-3, p. 81-92, 2001. DOI: 10.1016/S1381-1177(01)00011-X.

Anexos



Figura 1

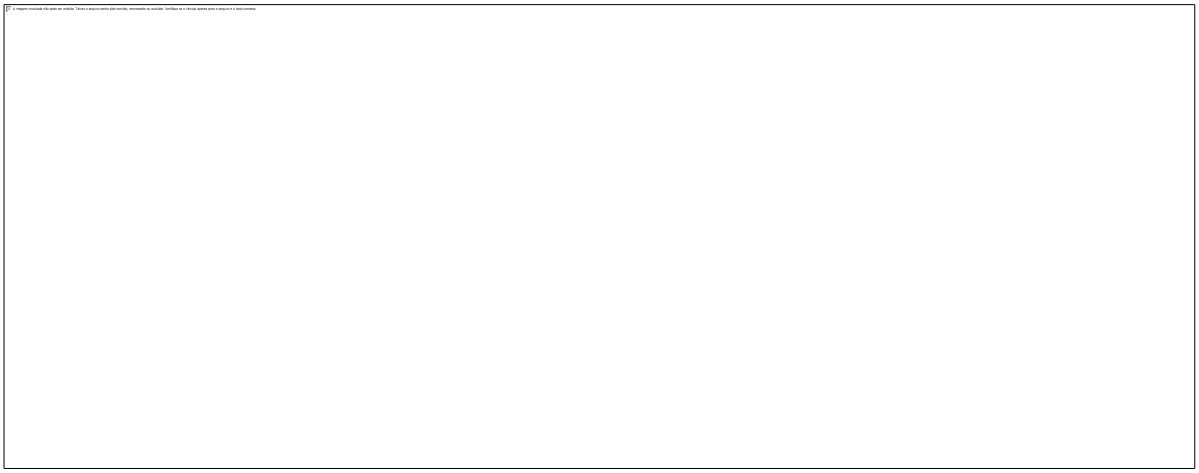


Figura 2



Figura 3

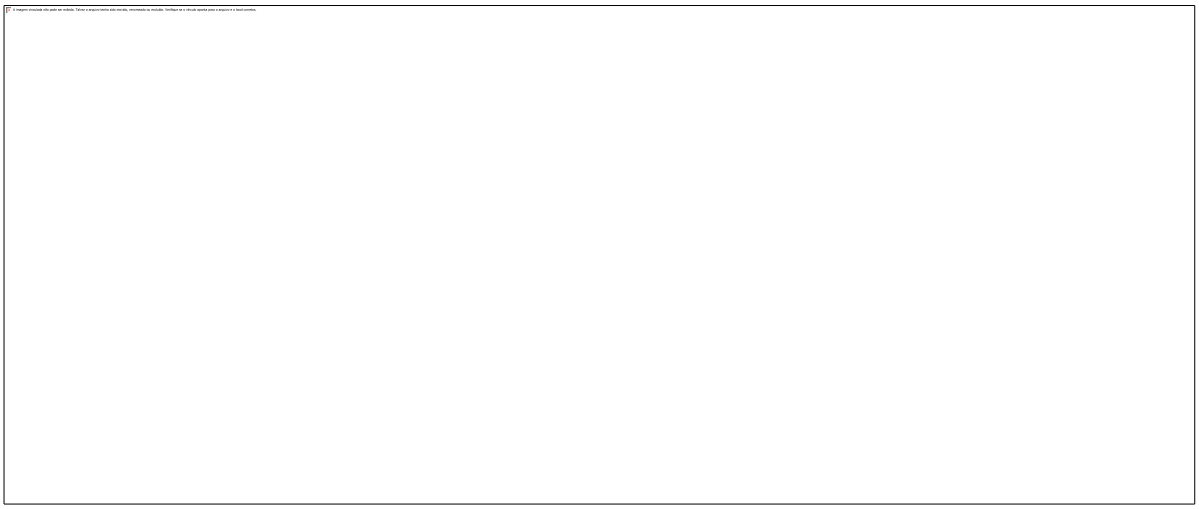


Tabela 1

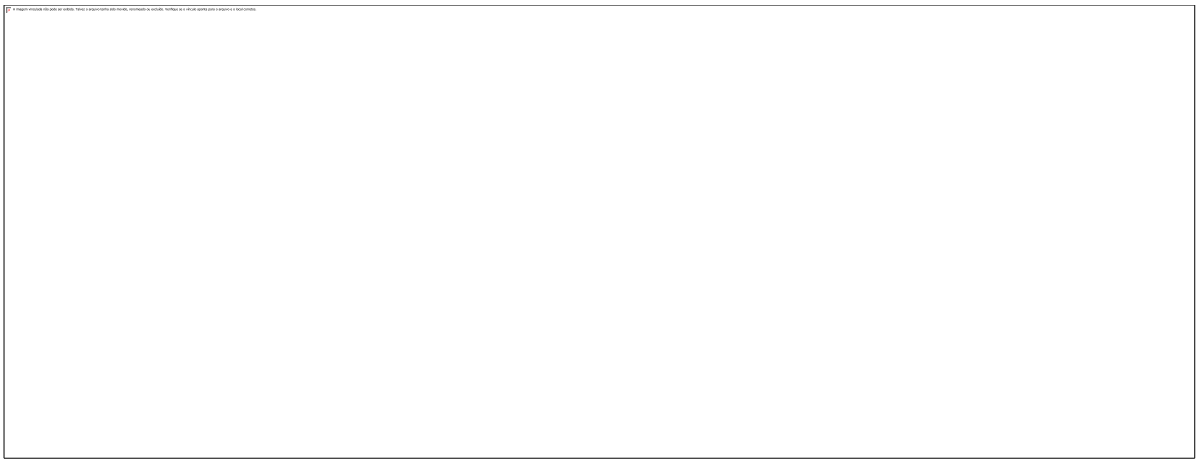


Tabela 2



Tabela 3

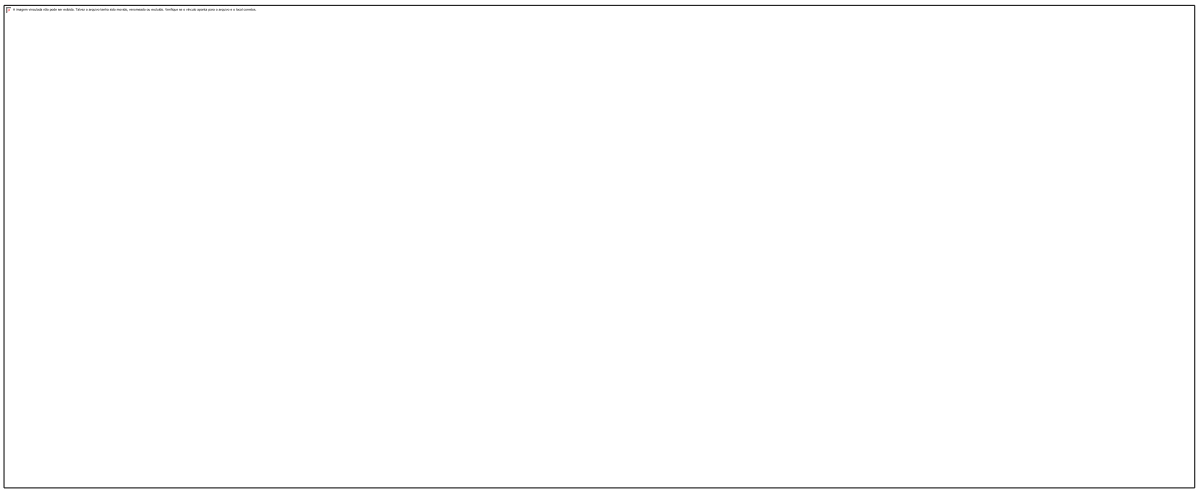


Tabela 4

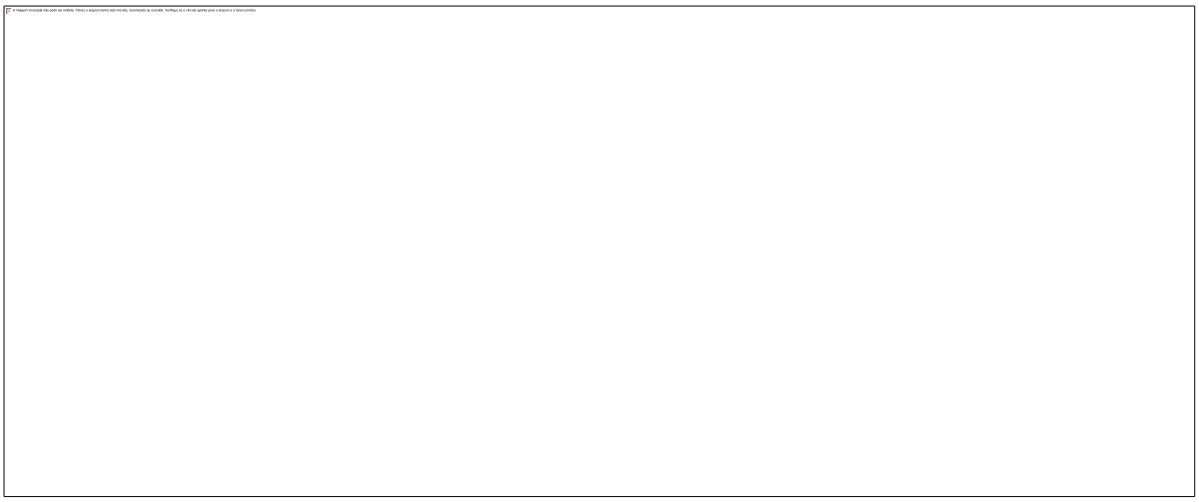


Tabela 5

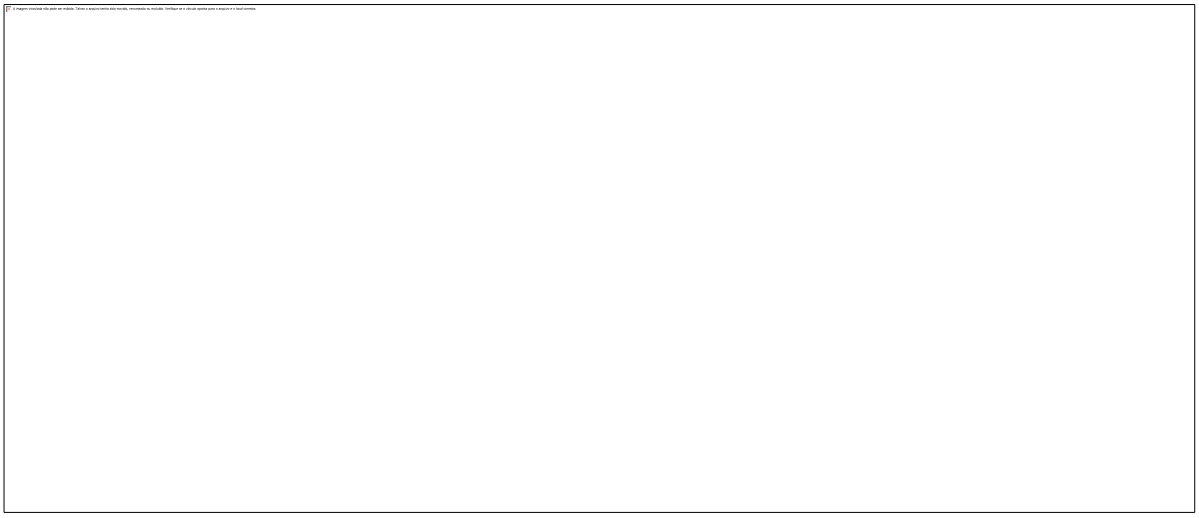


Tabela 6



Tabela 7

CÓDIGO: ET0361

AUTOR: DENER FRANCISCO DA SILVA

ORIENTADOR: ANDRE ANDERSON COSTA PEREIRA

TÍTULO: Caracterização dos pós e avaliação bioativa das folhas da Arrabidaea Chica e Kalanchoe laetivirens

Resumo

A secagem de materiais vegetais constitui uma importante operação de processamento para a conservação de características físico-químicas e compostos bioativos presentes nas plantas. Neste trabalho, foram avaliados métodos de secagem aplicados às folhas de *Arrabidaea chica* (crajiru) e *Kalanchoe laetivirens* (aranto), com o objetivo de investigar a influência das condições de secagem sobre as características dos materiais obtidos e seu potencial bioativo. As amostras foram submetidas à secagem em estufa e em leito de jorro, nas temperaturas de 50 e 70°C. Foram realizadas análises de atividade de água, sólidos solúveis totais, higroscopicidade, umidade relativa de equilíbrio e testes qualitativos relacionados à presença de compostos bioativos. A atividade de água apresentou valores entre 0,436 e 0,699 entre as condições avaliadas, sendo o menor valor observado para o aranto seco em leito de jorro a 70°C e o maior para o aranto seco em estufa a 70°C. Para o crajiru seco em leito de jorro a 50°C, os sólidos solúveis totais apresentaram média de 2,87°Brix, enquanto a higroscopicidade apresentou média de 15,96%. Os testes qualitativos indicaram a presença de compostos com potencial antioxidante e de pigmentos antociânicos. Os resultados obtidos demonstram que o método de secagem, a temperatura e as características de cada espécie podem influenciar as propriedades dos pós obtidos. As análises quantitativas serão realizadas nas etapas posteriores da pesquisa.

Palavras-chave: Secagem. Leito de jorro. Arrabidaea chica. Kalanchoe laetivirens.

TITLE: Characterization of Powders and Bioactive Evaluation of Arrabidaea chica and Kalanchoe laetivirens Leaves

Abstract

Drying of plant materials is an important processing operation for preserving their physicochemical characteristics and bioactive compounds. In this study, drying methods applied to the leaves of *Arrabidaea chica* (crajiru) and *Kalanchoe laetivirens* (aranto) were evaluated, aiming to investigate the influence of drying conditions on the characteristics of the obtained materials and their bioactive potential. The samples were subjected to drying in an oven and in a spouted bed at temperatures of 50 and 70°C. Water activity, total soluble solids, hygroscopicity, equilibrium relative humidity and qualitative tests related to the presence of bioactive compounds were performed. Water activity values ranged from 0.436 to 0.699 among the evaluated conditions, with the lowest value observed for aranto dried in the spouted bed at 70°C and the highest for aranto dried in the oven at 70°C. For crajiru dried in the spouted bed at 50°C, total soluble solids presented an average of 2.87°Brix, while hygroscopicity presented an average of 15.96%. Qualitative tests indicated the presence of compounds with antioxidant potential and anthocyanin pigments. The results demonstrate that the drying method, temperature and characteristics of each species may influence the properties of the obtained powders. Quantitative analyses will be conducted in the subsequent stages of the research.

Keywords: Drying. Spouted bed. Arrabidaea chica. Kalanchoe laetivirens.

Introdução

As plantas medicinais e espécies vegetais com potencial funcional apresentam importância devido à presença de compostos bioativos, como compostos fenólicos, flavonoides e antocianinas, associados a diferentes propriedades biológicas, incluindo a atividade antioxidante. A composição desses constituintes pode ser influenciada pelas condições ambientais e de processamento, tornando importante o estudo de métodos adequados para sua conservação e utilização (BELWAL et al., 2022).

A secagem é uma importante operação unitária empregada no processamento de materiais vegetais, pois permite a redução do teor de água, favorecendo a estabilidade, o armazenamento e o transporte do produto. Entretanto, temperatura e tempo de processamento podem provocar alterações nas características físicas e químicas do material e na estabilidade de seus compostos bioativos. Dessa forma, a escolha das condições de secagem é fundamental para minimizar possíveis perdas e obter produtos com características adequadas (BELWAL et al., 2022).

Entre os equipamentos utilizados na secagem de materiais particulados, o leito de jorro apresenta características favoráveis ao processamento de materiais vegetais devido à intensa movimentação das partículas e à transferência de calor e massa proporcionada pelo contato entre o material e o fluido de secagem. O processo apresenta relevância para a Engenharia Química por envolver fenômenos de transporte relacionados à remoção de umidade (OLIVEIRA; FREIRE; MASSARANI, 1998).

Nesse contexto, destacam-se o crajiru (*Arrabidaea chica*) e o aranto (*Kalanchoe laetivirens*). O crajiru, pertencente à família Bignoniaceae, apresenta em suas folhas diferentes compostos fenólicos e carotenoides, além de demonstrar capacidade antioxidante em estudos com seus extratos (SIQUEIRA et al., 2019). A espécie também apresenta pigmentos da classe das 3-desoxiantocianidinas, compostos de interesse devido às suas características químicas e biológicas (BEHRENS; TELLIS; CHAGAS, 2012). O

aranto, pertencente à família Crassulaceae, também apresenta potencial de interesse científico devido à presença de metabólitos secundários. Estudos realizados com *K. laetivirens* identificaram uma cianidina glicosilada em seus extratos e avaliaram seu potencial antimicrobiano, demonstrando a presença de compostos de interesse na espécie (FERREIRA et al., 2021).

A obtenção de pós dessas espécies por meio da secagem pode facilitar seu armazenamento, transporte e posterior utilização. Entretanto, é necessário avaliar as características dos materiais obtidos e a influência das condições de processamento sobre suas propriedades. Parâmetros como umidade, sólidos solúveis totais, higroscopicidade, pH, atividade de água e atividade antioxidante podem contribuir para a caracterização dos pós e para a avaliação de seu potencial de aplicação.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar a secagem das folhas de *Arrabidaea chica* e *Kalanchoe laetivirens* em estufa e em leito de jorro, nas temperaturas de 50 e 70°C, caracterizando os pós obtidos quanto às suas propriedades físico-químicas e ao potencial bioativo. Busca-se identificar condições de processamento que contribuam para a obtenção de materiais com características adequadas e potencial de aplicação em produtos alimentícios e funcionais.

Metodologia

Foram utilizadas folhas de crajiru (*Arrabidaea chica*) e aranto (*Kalanchoe laetivirens*). Após a coleta, as folhas foram selecionadas, lavadas, sanitizadas, cortadas e trituradas. Posteriormente, o material foi pesado em balança de precisão e submetido aos tratamentos de secagem.

Secagem em estufa

A secagem em estufa com circulação de ar foi realizada nas temperaturas de 50 e 70°C, utilizando o método de secagem em camada de espuma. Para esse procedimento, o material foi distribuído em camada sobre bandejas e submetido à circulação de ar aquecido. Foram avaliadas condições de secagem com e sem a utilização da formação de espuma. Quando utilizada, a espuma foi preparada com 1% de liga neutra e 6% de emulsificante, seguida de homogeneização em batedor planetário, sendo posteriormente distribuída sobre as bandejas para a secagem.

A cinética de secagem foi realizada somente para os ensaios em estufa utilizando o método de secagem em camada de espuma, acompanhando-se a redução da massa das amostras em intervalos regulares de tempo. A partir dos dados obtidos, foi calculado o teor de umidade em base seca (X) e a Razão de umidade (RU), conforme:

$$RU = (X - Xe)/(X_0 - Xe)$$

em que X corresponde ao teor de umidade da amostra no tempo considerado, X_0 ao teor de umidade inicial e Xe ao teor de umidade de equilíbrio. Os valores de RU foram utilizados para construir as curvas de cinética de secagem em função do tempo.

Os dados experimentais de RU obtidos na estufa foram ajustados ao modelo de Henderson & Pabis, representado pela equação:

$$RU = a \cdot \exp(-kt)$$

em que a é o parâmetro do modelo, k é a constante de secagem (min^{-1}) e t é o tempo de secagem (min). A qualidade do ajuste foi avaliada exclusivamente pelo coeficiente de determinação (R^2), sendo considerados mais adequados os ajustes que apresentaram valores de R^2 mais próximos de 1.

Secagem em leito de jorro

A secagem em leito de jorro foi realizada nas temperaturas de 50 e 70 °C, utilizando partículas inertes de polietileno, com massa de 2 kg e diâmetro de 3,2 ± 0,05 mm. Para o crajiru, o material triturado foi submetido diretamente ao processo de secagem. Para o aranto, o material foi previamente misturado à maltodextrina, correspondente a 10% da massa do material, e a mistura foi alimentada ao equipamento por meio de uma bomba peristáltica. Para os materiais obtidos por esse processo, não foi realizada a cinética de secagem, sendo conduzidas apenas as análises físico-químicas dos pós obtidos.

Caracterização dos pós

A atividade de água (aw) dos pós foi determinada em duplicata utilizando um analisador AquaLab, após acondicionamento das amostras conforme as condições recomendadas pelo equipamento. A análise foi realizada para avaliar a disponibilidade de água nos materiais e sua relação com a estabilidade e conservação dos pós.

A higroscopicidade foi determinada utilizando soluções salinas saturadas para estabelecer diferentes condições de umidade relativa. As amostras foram pesadas inicialmente e acondicionadas em recipientes fechados contendo as soluções salinas, sendo realizadas pesagens periódicas até atingir massa constante. A variação de massa foi utilizada para avaliar o comportamento higroscópico dos materiais.

A umidade relativa de equilíbrio foi avaliada utilizando soluções saturadas de KCl, NaCl e $MgCl_2$, acompanhando-se a variação da massa das amostras durante o armazenamento em dessecadores. O equilíbrio foi considerado atingido quando a massa se tornou constante ou apresentou variação insignificante.

Também foram realizadas análises de sólidos solúveis totais por refratometria e testes qualitativos para investigação da presença de compostos com potencial antioxidante e de pigmentos antociânicos. Para a avaliação qualitativa de compostos antioxidantes, foi utilizada tintura de iodo, tendo o ácido ascórbico como referência. Para a investigação de antocianinas, foram utilizados ácido oxálico e bicarbonato de sódio.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos permitiram avaliar o comportamento dos pós de *Arrabidaea chica* (crajiru) e *Kalanchoe laetivirens* (aranto) após os processos de secagem, considerando a cinética em estufa utilizando o método de secagem em camada de espuma, a atividade de água, os sólidos solúveis totais, a higroscopicidade, o equilíbrio higroscópico e os testes qualitativos relacionados à presença de compostos bioativos.

3.1 Cinética de secagem

A cinética de secagem foi acompanhada por meio da redução da massa das amostras ao longo do tempo. A partir dos dados experimentais, foram calculados os valores de umidade em base seca e a Razão de umidade (RU), utilizada para representar a redução da umidade durante o processo. A RU foi calculada considerando a umidade da amostra em cada instante em relação às umidades iniciais e de equilíbrio.

As Figuras 1 e 2 apresentam as curvas de Razão de umidade para o crajiru e o aranto, respectivamente, submetidos à secagem em estufa utilizando camada de espuma nas temperaturas de 50 e 70°C. Em todas as condições observou-se redução da RU com o aumento do tempo, comportamento esperado devido à remoção progressiva da água presente nas amostras.

Para o crajiru a 50°C, a RU reduziu de 1,00 no início do processo para aproximadamente 0,38 aos 60 minutos. A curva apresentou redução gradual, com maior velocidade de remoção de água nas etapas iniciais e redução progressiva da inclinação ao longo do processo. Na temperatura de 70°C, a RU atingiu aproximadamente 0,13 aos 60 minutos, apresentando uma redução mais acentuada em comparação à condição de 50°C.

A maior redução da RU observada a 70°C indica que o aumento da temperatura favoreceu a velocidade de secagem do crajiru. Esse comportamento pode ser relacionado ao aumento da diferença de pressão de vapor entre o material e o ar de secagem, favorecendo a transferência de água para o meio. Assim, para o intervalo avaliado, o tratamento a 70°C apresentou maior remoção de umidade em menor tempo.

Para o aranto, a 50°C, a RU apresentou redução mais lenta, passando de 1,00 para aproximadamente 0,65 ao final dos 80 minutos. Já a 70°C, a RU apresentou redução mais acentuada, atingindo aproximadamente 0,27 aos 80 minutos. Portanto, assim como observado para o crajiru, o aumento da temperatura proporcionou maior redução da RU ao longo do tempo.

Comparando as duas espécies, o aranto apresentou uma secagem mais lenta a 50°C, enquanto a 70°C apresentou uma redução mais expressiva da RU. Essa diferença pode estar relacionada às características estruturais e à composição da matéria-prima, além da forma como a água está associada aos componentes da matriz vegetal.

A redução da velocidade de secagem ao longo do processo pode ser explicada pela diminuição da quantidade de água disponível para evaporação e pelo aumento da resistência à transferência de massa. Nas etapas iniciais, a água mais facilmente removível é retirada com maior velocidade; posteriormente, a remoção torna-se mais lenta devido à maior dificuldade de migração da água do interior das partículas até a superfície.

De modo geral, as curvas demonstraram que a temperatura de 70°C proporcionou maior velocidade de redução da Razão de umidade para ambas as espécies. Entretanto, a escolha da condição de secagem não deve considerar somente a velocidade do processo, uma vez que temperaturas mais elevadas podem provocar alterações nos compostos presentes na matéria-prima.

3.2 Ajuste dos modelos matemáticos

Os dados experimentais de Razão de umidade obtidos na secagem em estufa utilizando camada de espuma foram ajustados ao modelo de Henderson & Pabis, representado pela equação:

$$RU = a \exp(-kt)$$

em que RU corresponde à Razão de umidade, a é o parâmetro do modelo, k é a constante de secagem e t representa o tempo de secagem.

As Figuras 3 e 4 apresentam os ajustes do modelo para o crajiru e o aranto, respectivamente. A avaliação da qualidade do ajuste foi realizada por meio do coeficiente de determinação (R^2), sendo considerados melhores os ajustes que apresentaram valores mais próximos de 1.

Para o crajiru a 50°C, o ajuste resultou na equação RU=1,0484 exp(-0,016t), com R^2=1,00. A 70°C, foi obtida a equação RU=1,1054 exp(-0,031t), também com R^2=1,00. Esses resultados indicam que o modelo de Henderson & Pabis apresentou excelente ajuste aos dados experimentais nas duas temperaturas avaliadas, reproduzindo adequadamente o comportamento das curvas de secagem. A constante de secagem k foi maior a 70°C (0,031 min^{-1}) em comparação a 50°C (0,016 min^{-1}), indicando maior velocidade de secagem com o aumento da temperatura.

Para o aranto a 50°C, o modelo apresentou a equação RU=1,0165exp(-0,005t), com R^2=1,00. A 70°C, a equação obtida foi RU=1,1007exp(-0,016t), também com R^2=1,00. Assim como observado para o crajiru, os resultados demonstram excelente concordância entre os valores experimentais e os estimados pelo modelo de Henderson & Pabis nas duas temperaturas avaliadas.

A comparação das constantes de secagem evidencia o efeito da temperatura sobre o processo. Para o aranto, o valor de k aumentou de 0,005 min^{-1} a 50°C para 0,016 min^{-1} a 70°C. Esse aumento indica que a elevação da temperatura favoreceu a remoção de água, resultando em maior velocidade de secagem. O mesmo comportamento foi observado para o crajiru, cujo valor de k aumentou de 0,016 min^{-1} a 50°C para 0,031 min^{-1} a 70°C. Dessa forma, os valores obtidos para a constante de secagem indicam que, para ambas as plantas, o aumento da temperatura promoveu uma secagem mais rápida, enquanto os valores de R^2=1,00 demonstram excelente ajuste do modelo de Henderson & Pabis aos dados experimentais.

3.3 Caracterização dos sólidos solúveis totais

Os sólidos solúveis totais foram determinados para o crajiru seco em leito de jorro a 50°C, utilizando proporção de 1:10 (m/V). Foram obtidos valores de 2,70, 3,00 e 2,90°Brix,

resultando em média de 2,87°Brix e desvio-padrão de aproximadamente 0,15°Brix. Conforme apresentado na tabela 1.

O valor médio de 2,87°Brix indica a quantidade de sólidos solúveis presentes na solução preparada a partir do pó vegetal, nas condições utilizadas para a análise. A baixa dispersão entre os resultados demonstra boa repetibilidade do procedimento nas três determinações.

Após a realização das análises das demais condições, os resultados poderão ser comparados para verificar a influência da temperatura e do método de secagem sobre os sólidos solúveis.

3.4 Higroscopicidade e equilíbrio higroscópico

A higroscopicidade do crajiru seco em leito de jorro a 50°C foi determinada em triplicata, apresentando valores de 16,19%, 15,91% e 15,78%, com média de 15,96%. Conforme apresentado na tabela 2.

O resultado demonstra que o pó apresenta capacidade de absorver umidade do ambiente. Essa característica é relevante para a conservação do material, pois a absorção de água pode provocar alterações físicas, como aglomeração das partículas e redução da fluidez, além de favorecer alterações químicas durante o armazenamento.

A média obtida foi superior aos valores de 5,00 a 13,81% relatados por Pereira et al. (2026) para pós de Arrabidaea chica submetidos à secagem em camada de espuma. A diferença pode estar relacionada às condições de processamento e ao método de secagem empregado, que podem modificar a estrutura das partículas e sua capacidade de interação com a água.

O comportamento higroscópico também foi avaliado por meio da exposição das amostras a diferentes umidades relativas estabelecidas com soluções saturadas de KCl, NaCl e $MgCl_2$. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Nas condições estabelecidas com KCl e NaCl, houve aumento de massa de 5,26% e 2,61%, respectivamente, indicando absorção de água pelo pó. Na condição de menor umidade relativa, estabelecida com $MgCl_2$, ocorreu redução de massa de 2,52%, indicando perda de água para o ambiente.

Esse comportamento evidencia a influência da umidade relativa do ambiente sobre o produto. Em condições de maior disponibilidade de água, o material tende a absorver umidade, enquanto em ambientes mais secos ocorre transferência de água do produto para o meio. Essas informações são importantes para a definição das condições de armazenamento e embalagem dos pós.

3.5 Análises qualitativas de compostos bioativos

Os testes qualitativos realizados com o extrato de crajiru indicaram resultados positivos para compostos com potencial antioxidante e para pigmentos antociânicos. Na avaliação de antocianinas, foram observadas alterações na coloração do extrato após a adição de ácido oxálico e bicarbonato de sódio, em comparação ao tubo de referência, sendo o resultado considerado indicativo da presença desses pigmentos.

Esse resultado está de acordo com estudos que identificaram diferentes 3-desoxiantocianidinas nas folhas de Arrabidaea chica, incluindo a carajurina (ZORN et al., 2001; DEVIA et al., 2002). A literatura também relata a presença de compostos fenólicos, flavonoides e carotenoides na espécie, além de atividade antioxidante em seus extratos (SIQUEIRA et al., 2019; SIRAICHI et al., 2013).

No teste qualitativo de atividade antioxidante, a adição de tintura de iodo provocou o desaparecimento da coloração do reagente no tubo contendo o extrato de crajiru, comportamento semelhante ao observado para o ácido ascórbico utilizado como referência. O resultado foi considerado indicativo da presença de substâncias com capacidade redutora.

Entretanto, por se tratar de um teste qualitativo, não é possível determinar a concentração dos compostos ou quantificar a capacidade antioxidante das amostras. Dessa forma, os resultados devem ser considerados como uma avaliação preliminar do potencial bioativo do material. A determinação quantitativa de compostos fenólicos pelo método de Folin-Ciocalteu e da atividade antioxidante pelo método de DPPH permitirá complementar essa caracterização.

3.6 Atividade de água (aw)

A atividade de água (aw) foi determinada em duplicata para os pós obtidos nas diferentes condições de secagem. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Os valores de aw variaram entre 0,436 e 0,699. O menor valor foi observado para o aranto seco em leito de jorro a 70°C (0,436), enquanto o maior foi obtido para o aranto seco em estufa utilizando o método de secagem em camada de espuma a 70°C (0,699).

Para o aranto seco em leito de jorro, houve redução da aw de 0,482 a 50°C para 0,436 a 70°C. Esse comportamento indica redução da disponibilidade de água no produto com o aumento da temperatura nesse método. Já para o crajiru seco em leito de jorro, os valores foram 0,492 e 0,498 a 50 e 70°C, respectivamente, apresentando pequena elevação.

Na estufa, com o método de secagem em camada de espuma, o crajiru apresentou aw de 0,492 a 50°C e 0,513 a 70°C. O aranto seco em estufa com camada de espuma a 70°C apresentou aw de 0,699, superior aos demais tratamentos avaliados.

A atividade de água está relacionada à quantidade de água disponível para participar de reações químicas, físicas e microbiológicas, sendo, portanto, um parâmetro importante para avaliação da estabilidade dos pós. Os resultados demonstram que a temperatura não apresentou o mesmo efeito sobre a aw para as duas espécies, indicando que as características da matriz vegetal também influenciam a disponibilidade de água no produto final.

3.7 Considerações gerais

Os resultados das curvas de Razão de umidade demonstraram que o aumento da temperatura de 50 para 70°C favoreceu a remoção de água durante a secagem em estufa utilizando o método de secagem em camada de espuma para as duas espécies. Para o crajiru, a RU final foi aproximadamente 0,38 a 50°C e 0,13 a 70°C, enquanto para o

aranto foi aproximadamente 0,65 e 0,27, respectivamente. O efeito da temperatura também foi confirmado pelos valores da constante de secagem do modelo de Henderson & Pabis, que aumentaram de 0,016 para 0,031 min^{-1} no crajiru e de 0,005 para 0,016 min^{-1} no aranto.

O modelo de Henderson & Pabis apresentou bons ajustes às curvas experimentais, com R^2 variando de 0,9702 a 0,9958. O maior valor foi observado para o aranto seco a 50°C, enquanto o menor foi obtido para o aranto a 70°C. Apesar das diferenças entre os ajustes, todos os valores indicam boa representação da tendência experimental.

Os resultados de atividade de água mostraram comportamento dependente tanto da espécie quanto do método de secagem. O menor valor de aw foi obtido para o aranto seco em leito de jorro a 70°C (0,436), enquanto o maior ocorreu para o aranto seco em estufa utilizando o método de secagem em camada de espuma a 70°C (0,699).

Para o crajiru seco em leito de jorro a 50°C, a média de sólidos solúveis foi de 2,87°Brix e a higroscopicidade média foi de 15,96%. O ensaio de equilíbrio higroscópico demonstrou ainda que o pó absorveu umidade em atmosferas de maior umidade relativa e perdeu água em condição de menor umidade relativa.

Os testes qualitativos também reforçaram o potencial do crajiru como fonte de compostos bioativos, com resultados indicativos da presença de substâncias com capacidade redutora e pigmentos antociânicos. Esses resultados são coerentes com a literatura que descreve a presença de compostos fenólicos, carotenoides, flavonoides e 3-desoxiantocianidinas na espécie.

De forma conjunta, os resultados mostram que a temperatura e as características de cada espécie influenciaram o comportamento da secagem e as propriedades dos pós obtidos. A análise da cinética, do ajuste de Henderson & Pabis, da atividade de água e das propriedades higroscópicas fornece informações importantes para avaliar a estabilidade dos materiais e auxiliar na escolha das condições de processamento mais adequadas.

Conclusão

Os resultados obtidos permitiram caracterizar os pós de crajiru (*Arrabidaea chica*) e aranto (*Kalanchoe laetivirens*) e avaliar a influência das condições de processamento sobre suas características físico-químicas e seu potencial bioativo. A análise das curvas de Razão de umidade mostrou que o aumento da temperatura de 50 para 70°C favoreceu a redução da umidade durante a secagem em estufa utilizando o método de camada de espuma para as duas espécies. Para o crajiru, a RU atingiu aproximadamente 0,38 a 50°C e 0,13 a 70°C, enquanto para o aranto os valores finais foram aproximadamente 0,65 e 0,27, respectivamente.

O modelo de Henderson & Pabis apresentou bom ajuste aos dados experimentais, com R^2 variando de 0,9702 a 0,9958. As constantes de secagem também aumentaram com a

temperatura, passando de 0,016 para 0,031 min^{-1} no crajiru e de 0,005 para 0,016 min^{-1} no aranto, indicando maior velocidade de secagem a 70°C.

A atividade de água apresentou valores entre 0,436 e 0,699. O menor valor foi observado para o aranto seco em leito de jorro a 70°C, enquanto o maior foi obtido para o aranto seco em estufa utilizando camada de espuma a 70°C. Esses resultados demonstram que o método de secagem e as características de cada espécie influenciaram a disponibilidade de água nos produtos.

Para o crajiru seco em leito de jorro a 50°C, foram obtidas médias de 2,87°Brix para sólidos solúveis totais e 15,96% para higroscopicidade. O ensaio de equilíbrio higroscópico demonstrou absorção de umidade nas condições de KCl e NaCl e perda de massa na condição estabelecida com $MgCl_2$, evidenciando a influência da umidade relativa sobre o comportamento do pó.

Os testes qualitativos indicaram a presença de compostos com potencial antioxidante e de pigmentos antociânicos no crajiru, resultados compatíveis com a literatura que descreve a presença de compostos bioativos nessa espécie. Entretanto, esses testes possuem caráter qualitativo e não permitem determinar a concentração ou a intensidade da atividade antioxidante.

Assim, os resultados demonstram o potencial das espécies estudadas para obtenção de pós por processos de secagem e fornecem informações relevantes sobre seu comportamento durante o processamento e armazenamento. A análise conjunta da cinética de secagem, do ajuste de Henderson & Pabis, da atividade de água e das propriedades higroscópicas contribui para a avaliação das condições de processamento, enquanto as análises quantitativas futuras poderão complementar a caracterização do potencial bioativo dos materiais.

Referências

BEHRENS, M. D.; TELLIS, C. J. M.; CHAGAS, M. S.Arrabidaea chica (Humb. & Bonpl.) B. Verlot (Bignoniaceae). Revista Fitos, Rio de Janeiro, v. 7, n. 4, p. 236-244, 2012. DOI: 10.32712/2446-4775.2012.165.

BELWAL, T. et al. Effects of different drying techniques on the quality and bioactive compounds of plant-based products: a critical review on current trends. Drying Technology, v. 40, n. 8, p. 1539-1561, 2022. DOI: 10.1080/07373937.2022.2068028.

OLIVEIRA, W. P.; FREIRE, J. T.; MASSARANI, G. Analogy between heat and mass transfer in three spouted bed zones during the drying of liquid materials. Drying Technology, v. 16, n. 9-10, p. 1939-1955, 1998. DOI: 10.1080/07373939808917504.

SIQUEIRA, F. C. et al. Profile of phenolic compounds and carotenoids of Arrabidaea chica leaves and the in vitro singlet oxygen quenching capacity of their hydrophilic

extract. Food Research International, v. 126, p. 108597, 2019. DOI: 10.1016/j.foodres.2019.108597.

FERREIRA, D. S.; SANTIAGO, P. A. L.; LIMA, B. R. de; SOARES, E. R.; ALMEIDA, R. A. de; OHSE, K. C.; CRUZ, A. de O.; SANTIAGO, S. R. S. da S. Caracterização química de uma cianidina glicosilada obtida a partir dos extratos de Kalanchoe laetivirens e avaliação do seu potencial antimicrobiano. Research, Society and Development, [S. l.], v. 10, n. 14, p. e345101421483, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i14.21483.

PEREIRA, A. A. C.; PAIVA, E. M. O.; PEDRINI, M. R. S.; OLIVEIRA, H. N. M.; SOUZA, G. F. V. Secagem em camada de espuma (foam-mat): caracterização e avaliação antioxidante das folhas da Arrabidaea chica. Revista Eletrônica Multidisciplinar de Investigação Científica, v. 5, n. 23, 2026. DOI: 10.47402/remici.v5n23323226.

ZORN, B.; GARCÍA-PIÑERES, A. J.; CASTRO, V.; MURILLO, R.; MORA, G.; MERFORT, I. 3-Desoxyanthocyanidins from Arrabidaea chica. Phytochemistry, v. 56, n. 8, p. 831–835, 2001. DOI: 10.1016/S0031-9422(01)00038-3.

DEVIA, B.; LLABRES, G.; WOUTERS, J.; DUPONT, L.; ESCRIBANO-BAILÓN, M. T.; DE PASCUAL-TERESA, S.; ANGENOT, L.; TITS, M. New 3-deoxyanthocyanidins from leaves of Arrabidaea chica. Phytochemical Analysis, v. 13, n. 2, p. 114–120, 2002. DOI: 10.1002/pca.632.

SIRAICHI, J. T. G.; FELIPE, D. F.; BRAMBILLA, L. Z. S.; et al. Antioxidant capacity of the leaf extract obtained from Arrabidaea chica cultivated in Southern Brazil. PLoS ONE, v. 8, n. 8, e72733, 2013. DOI: 10.1371/journal.pone.0072733.

Anexos



Figura 1 – Curvas de Razão de umidade do crajiru submetido à secagem em estufa a 50 e 70 °C.

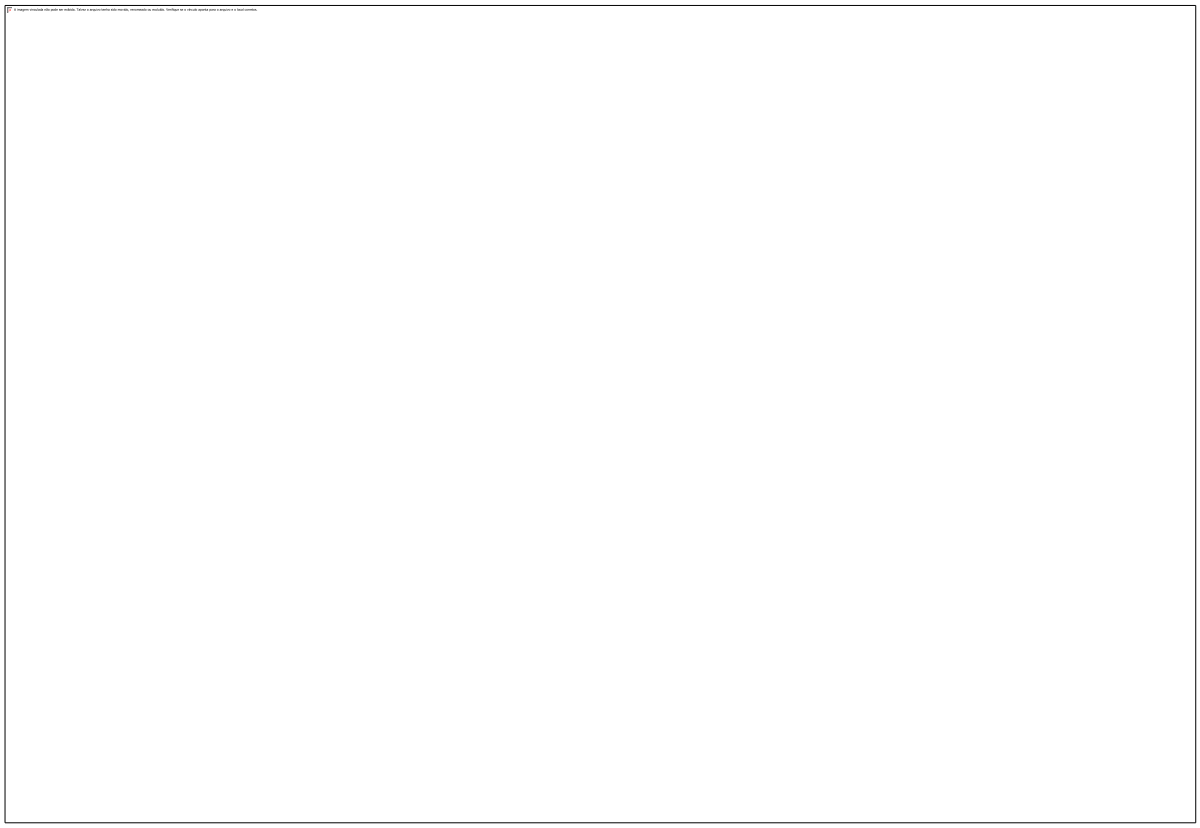


Figura 2 – Curvas de Razão de umidade do aranto submetido à secagem em estufa a 50 e 70 °C.

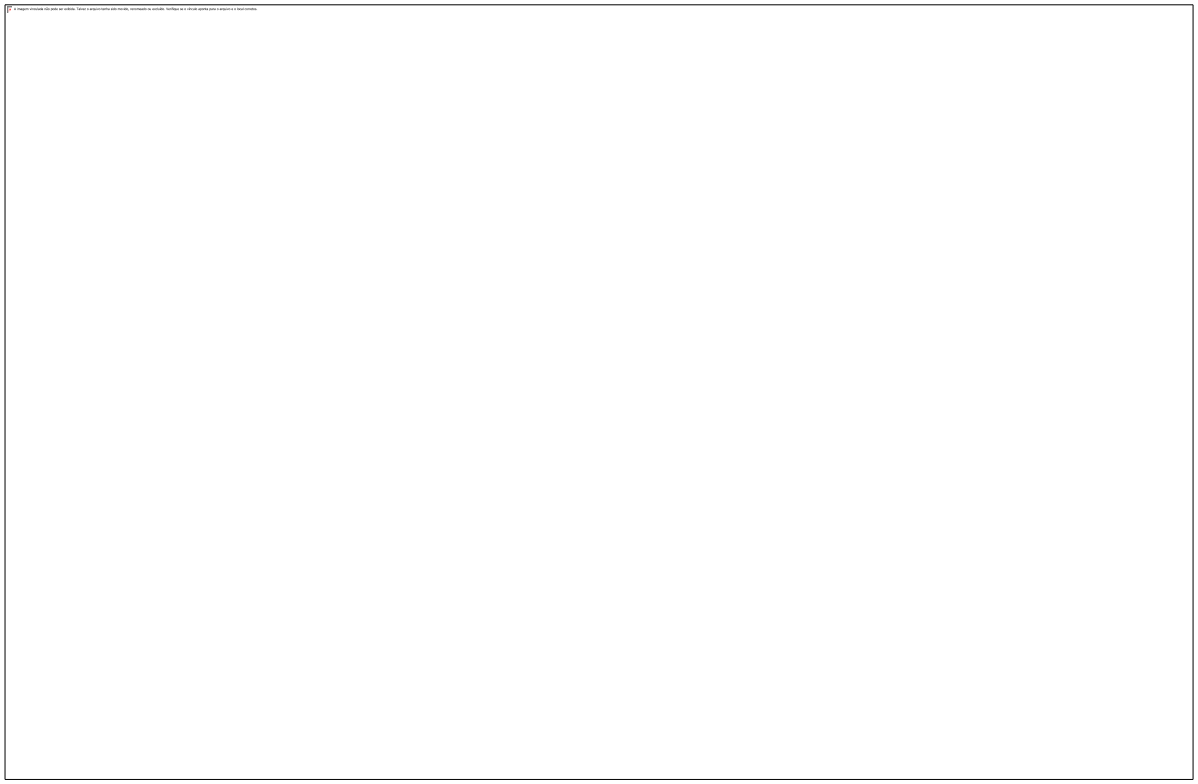


Figura 3 – Curvas de Razão de umidade do crajiru submetido à secagem em estufa a 50 e 70 °C utilizando o modelo Henderson & Pabis.

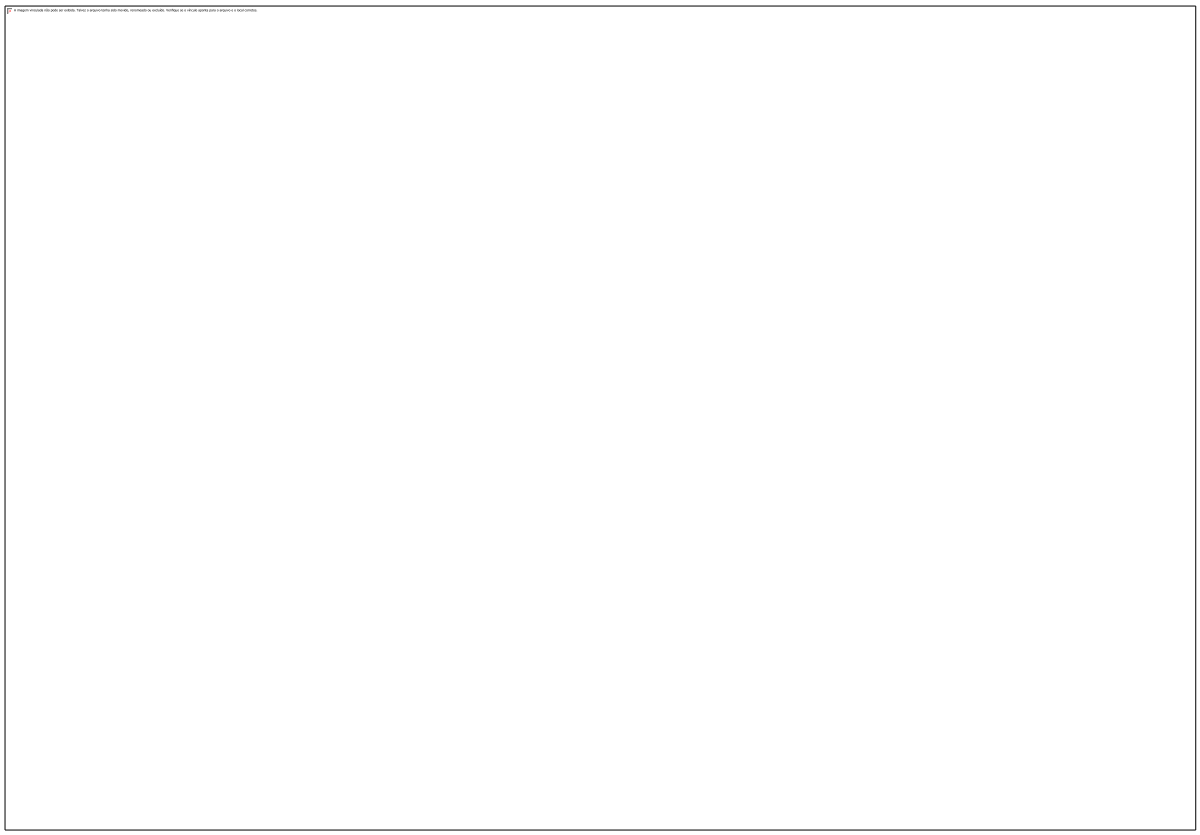


Figura 4 – Curvas de Razão de umidade do aranto submetido à secagem em estufa a 50 e 70 °C utilizando o modelo Henderson & Pabis.

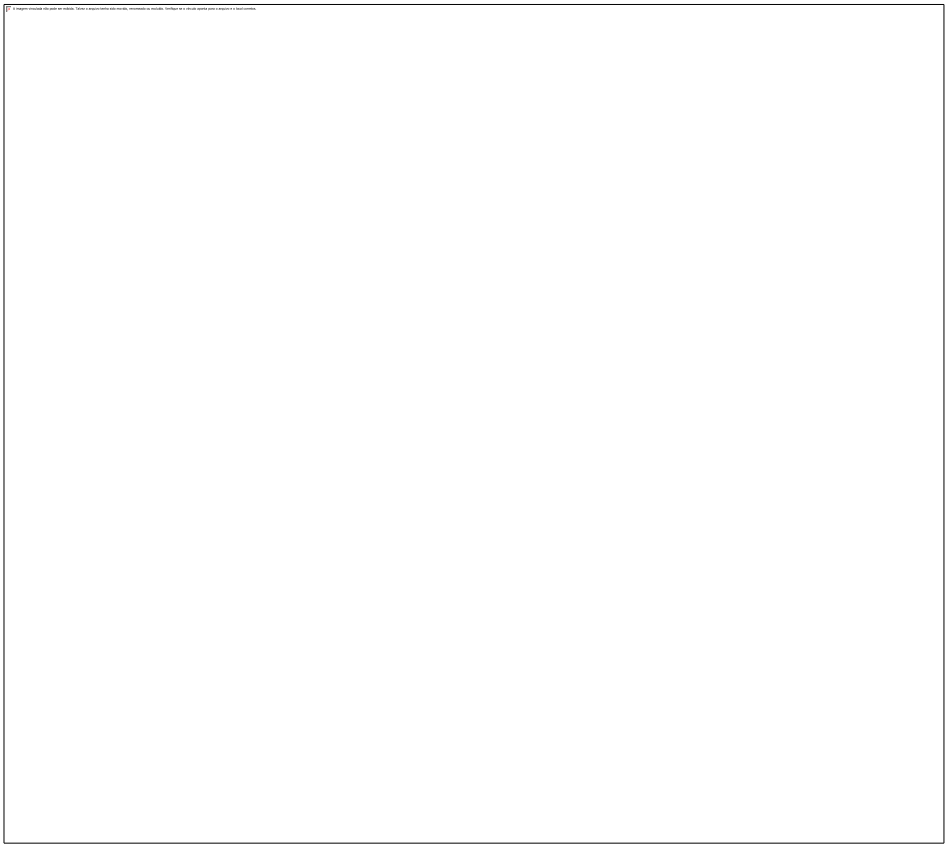


Figura 5 – Leito de Jorro.

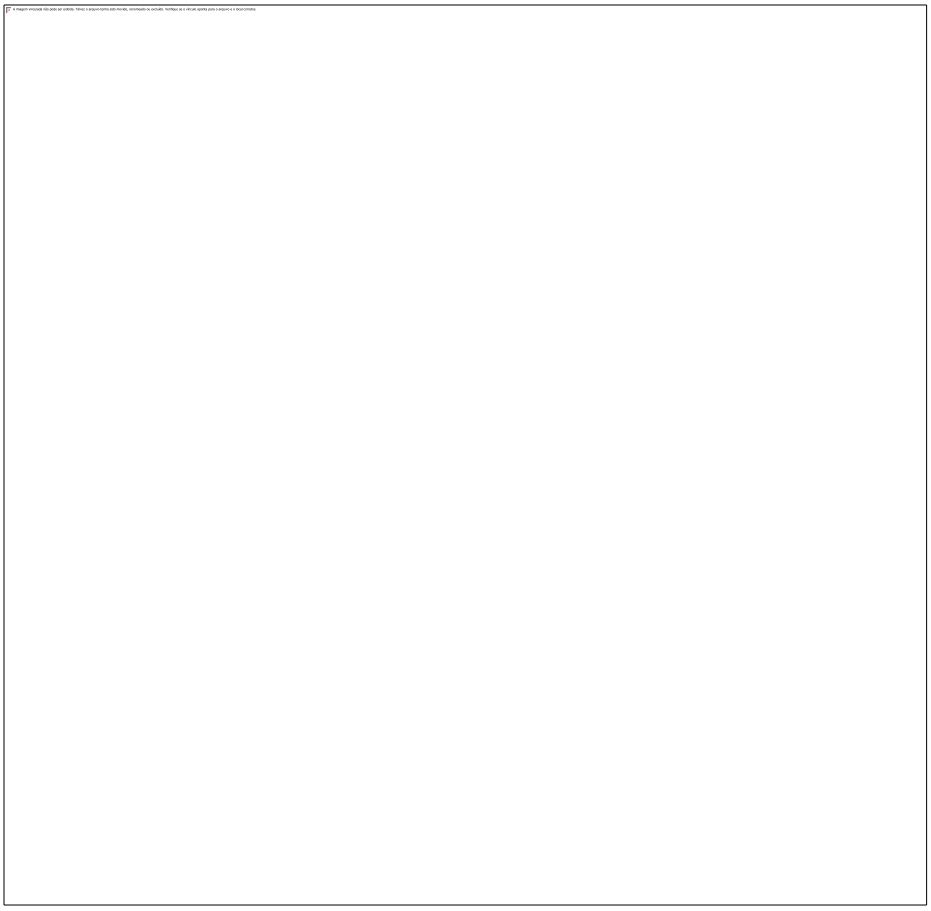


Figura 6 – Estufa com circulação de ar.

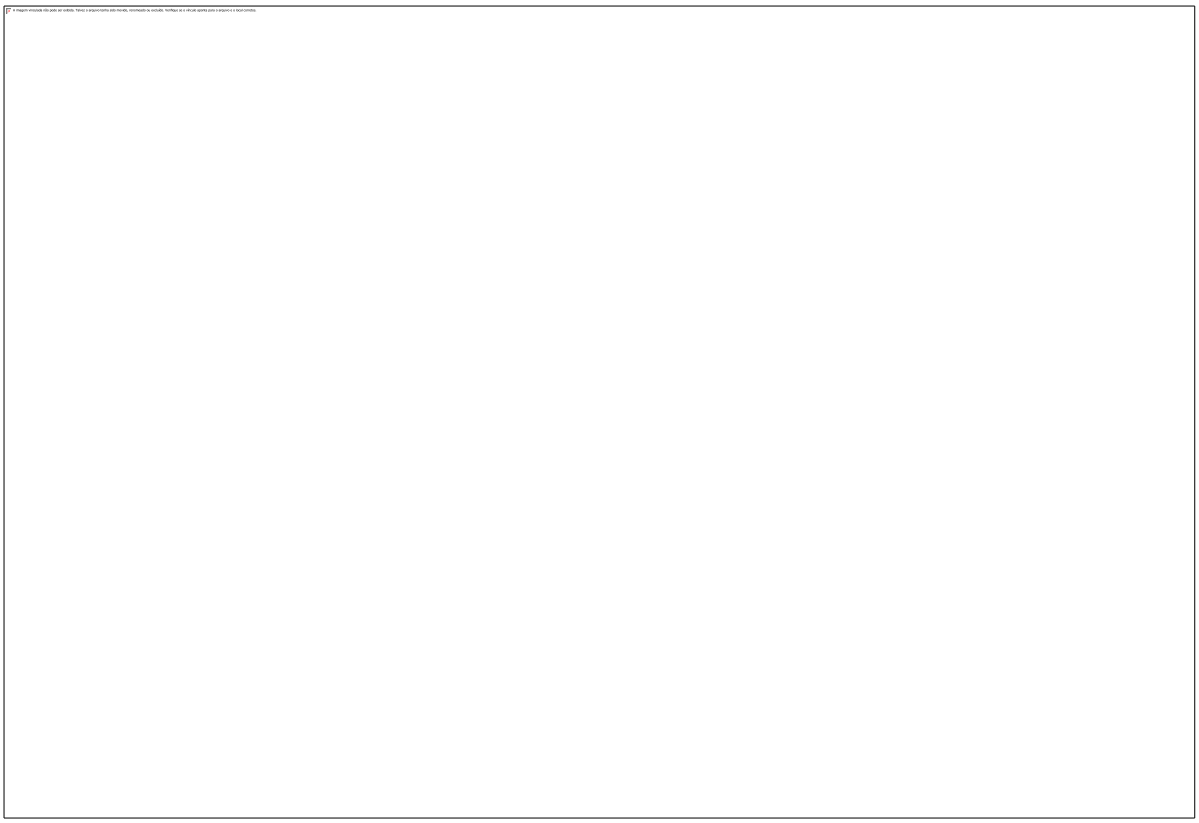


Figura 7 – Homogeneização da mistura de crajiru (Arrabidaea chica), liga neutra e emulsificante para formação da espuma utilizada na secagem em camada.



Figura 8 – Teste qualitativo de compostos com potencial antioxidante no pó de crajiru (Arrabidaea chica) utilizando tintura de iodo, com ácido ascórbico(tubo da esquerda) como referência.

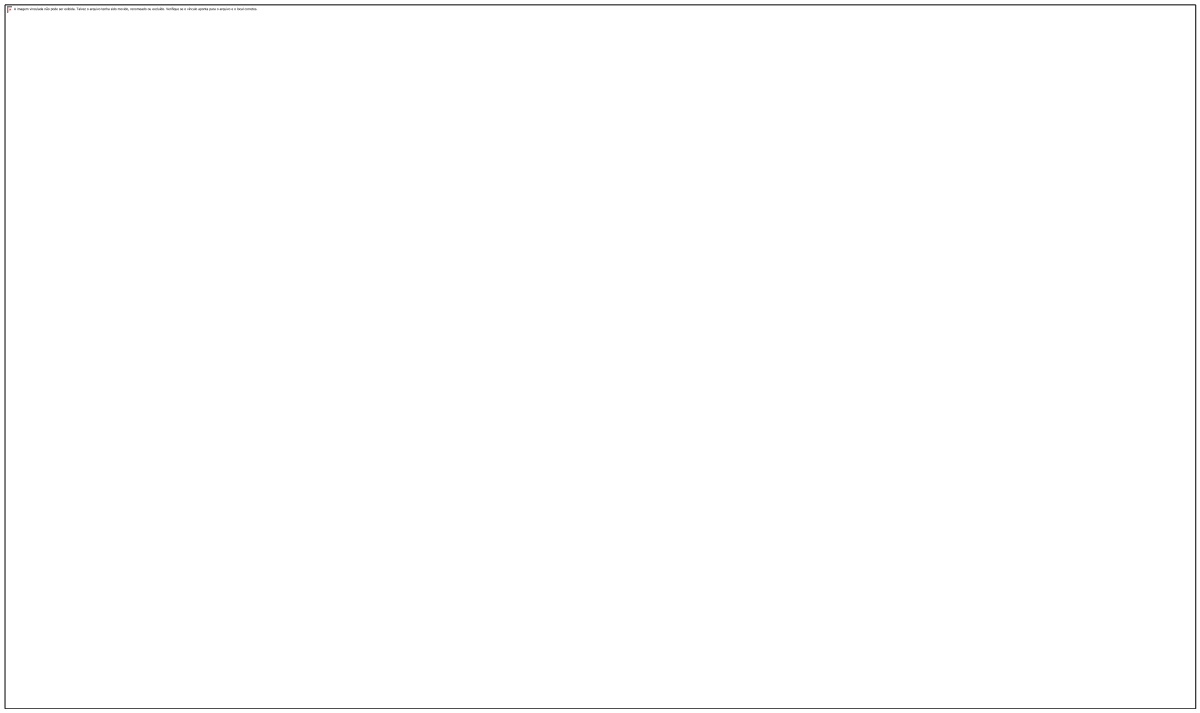


Figura 9 – Teste qualitativo para identificação de antocianinas no pó de crajiru (Arrabidaea chica) após tratamento com ácido oxálico(tubo da esquerda) e bicarbonato de sódio(tubo da direita).

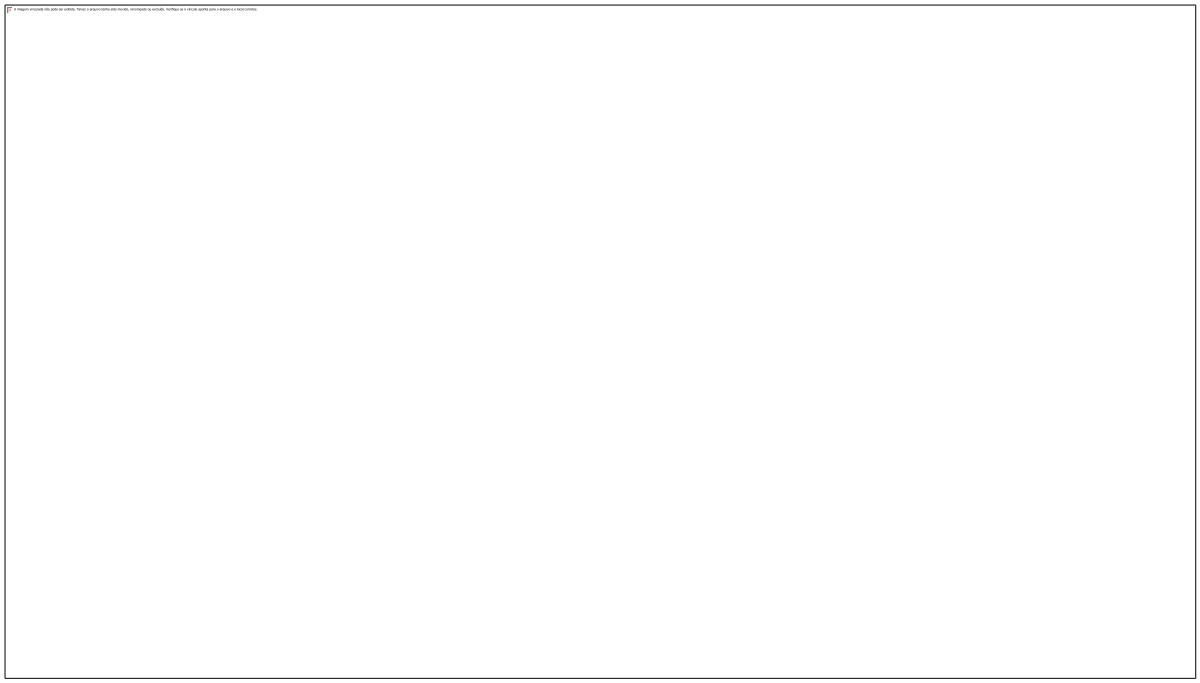


Figura 10 – Amostras de pó de crajiru (Arrabidaea chica) durante o ensaio de higroscopicidade e umidade de equilíbrio.



Figura 11 – crajiru (Arrabidaea chica) pós secagem em estufa utilizando método de camada de espuma.

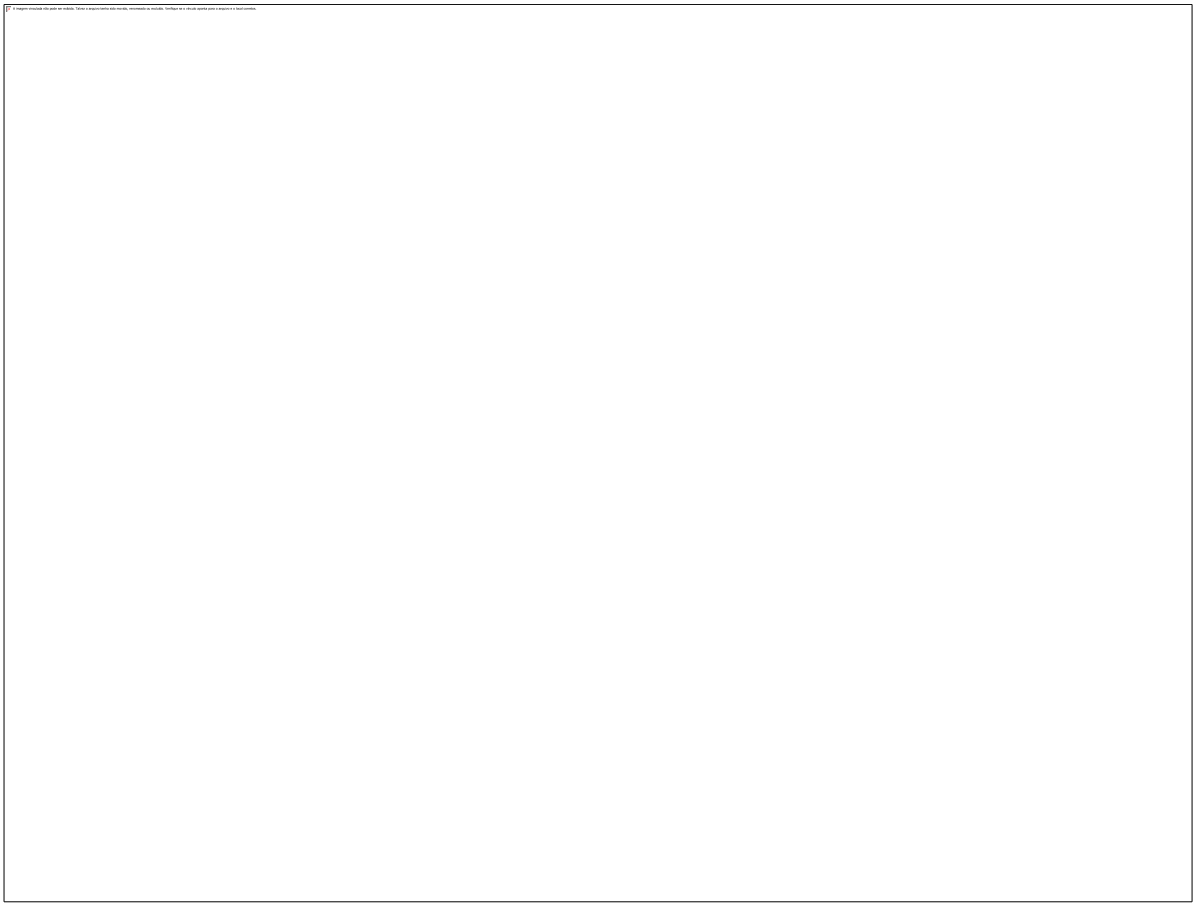


Figura 11 – crajiru (Arrabidaea chica) pós secagem em leito de jorro.



Tabela 1 – Sólidos solúveis totais do crajiru seco em leito de jorro a 50 °C.

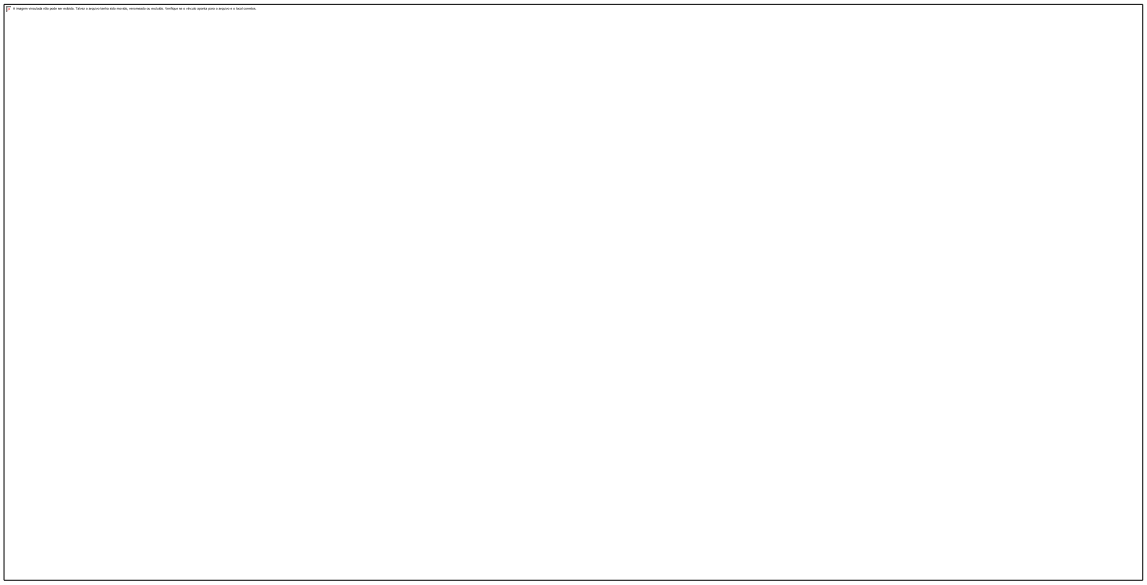


Tabela 2 – Higroscopicidade do crajiru seco em leito de jorro a 50°C.



Tabela 3 – Variação de massa das amostras durante o ensaio de equilíbrio.

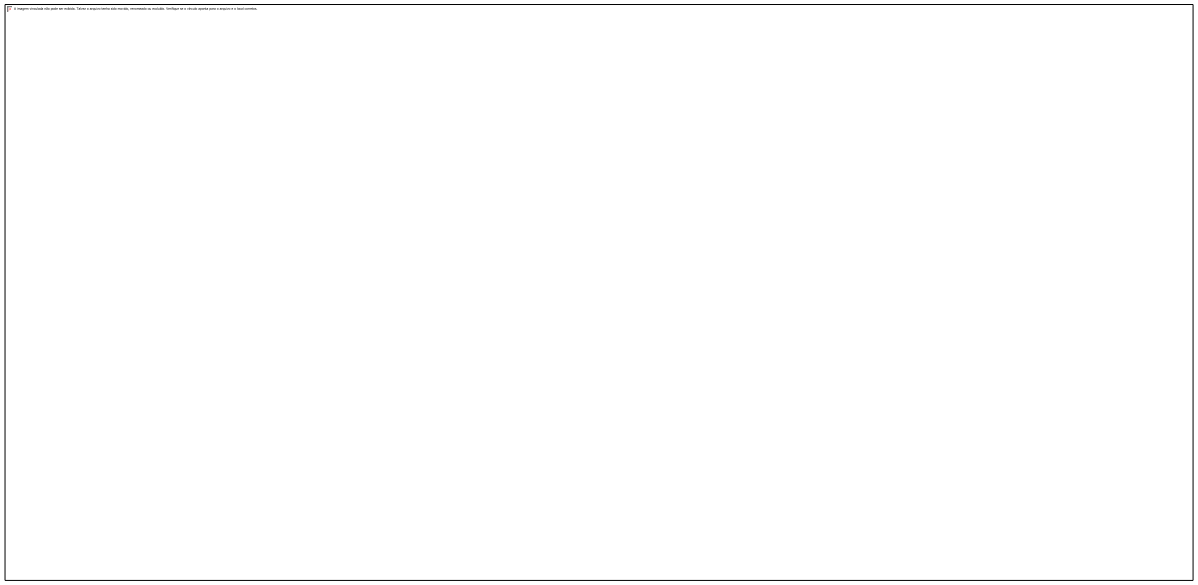


Tabela 4 - Atividade de água (aw) das amostras de Aranto e Crajiru obtidas por diferentes métodos e temperaturas de secagem.

CÓDIGO: ET0364

AUTOR: RODRIGO HIDEKI KUBO

ORIENTADOR: EDSON NORIYUKI ITO

TÍTULO: Produção e caracterização de filamentos sustentáveis de polipropileno reciclado com nanoargilas para impressão 3D

Resumo

A impressão 3D (IMP3D) é uma técnica de manufatura aditiva (MA) que permite a fabricação de peças a partir de modelos tridimensionais. Entre elas podemos destacar a Fabricação por Filamentos Fundido (FFF) que utiliza filamentos termoplásticos como matéria-prima. Neste trabalho, foram produzidos filamentos de polipropileno reciclado (PPr) e dos nanocompósitos de PPr com 1, 3 e 5 em % de peso de montmorilonita organicamente modificada (OMMT). Foram avaliados aspectos dimensionais, morfológicos, mecânicos e estruturais. Os resultados mostraram a viabilidade do processamento, apesar das dificuldades de controle dimensional e impressão.

Palavras-chave: Impressão 3D;manufatura aditiva;polipropileno reciclado;montmorilonita

TITLE: Production and characterization of sustainable recycled polypropylene filaments with nanoclays for 3D printing

Abstract

3D printing (3DP) is an additive manufacturing (AM) technique that enables the fabrication of parts from three-dimensional models. Notable among these techniques is Fused Filament Fabrication (FFF), which uses thermoplastic filaments as raw material. In this study, filaments made of recycled polypropylene (rPP) and rPP nanocomposites containing 1, 3, and 5 wt% organically modified montmorillonite (OMMT) were produced. Dimensional, morphological, mechanical, and structural aspects were evaluated. The results demonstrated the feasibility of the processing, despite challenges regarding dimensional control and printing.

Keywords: 3D printing;additive manufacturing;recycled polypropylene;montmorillon

Introdução

Conforme o avanço das indústrias, os materiais poliméricos passaram a ser amplamente utilizados devido à sua combinação de propriedades como sua baixa densidade, baixo custo, sua resistência química e sua facilidade de processamento. Entre eles, os termoplásticos possuem a capacidade de serem reprocessados por meio do aquecimento, característica que favorece sua reciclagem e reutilização[1]. Com os avanços nos processos de fabricação,surgiram técnicas de Manufatura Aditiva (MA), que permitem a produção de peças tridimensionais de forma precisa e personalizada pela adição sucessiva de material a partir de um modelo desejado. A Fabricação por Filamento Fundido (FFF) destaca-se por utilizar filamentos termoplásticos como matéria-prima para impressão 3D(IMP3D)[2]. O polipropileno (PP) é um dos termoplásticos amplamente utilizados pela indústria, presente desde sacolas plásticas até recipientes. O PP destaca-se devido a sua baixa densidade, resistência química, alta tenacidade ao impacto e processabilidade [3]. Essas propriedades permitem sua utilização em diferentes aplicações. Em estudo anterior, Silva [7] e [8] avaliou o processamento do polipropileno reciclado proveniente de garrafões de água com diferentes teores de OMMT. O presente trabalho dá continuidade ao estudo dessas formulações, utilizando os nanocompósitos previamente produzidos na forma de pellets para a obtenção de filamentos destinados à impressão 3D. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi produzir filamentos de PPr e dos nanocompósitos a partir das formulações previamente desenvolvidas, visando sua aplicação na impressão 3D por FFF. Os filamentos produzidos foram utilizados na impressão de corpos de prova do tipo I, conforme a norma ASTM D638, para avaliar as propriedades mecânicas, morfológicas e estruturais dos materiais.

Metodologia

Os materiais utilizados na produção dos filamentos são o polipropileno reciclado (PPr) (MFI=8,85g/10min) e a argila organofilica montmorilonita quimicamente modificada com um sal de amónio quaternário (Cloisite® 30B) (OMMT), da Southern Clays. As amostras foram identificadas como PPr/OMMT (100/0), correspondente ao polipropileno reciclado sem adição de OMMT; PPr/OMMT (100/1), contendo 1% de OMMT; PPr/OMMT (100/3), contendo 3% de OMMT; e PPr/OMMT (100/5), contendo 5% de OMMT. Métodos: I) Mistura em extrusora de rosca dupla O polipropileno reciclado e as formulações do PPr com 1, 3 e 5% em massa de OMMT obtidas por Silva [7] e utilizadas nesse estudo foram previamente processadas em extrusora dupla rosca co-rotacional da empresa AX Plásticos Máquinas Técnicas, modelo AX – DR 16:40, com diâmetro de 16 mm de rosca, razão de aspecto (L/D) igual a 40, com perfil de temperatura de 100/150/200/200/200/210/210/210 °C com a rotação da rosca de 250 rpm. II) Produção de filamentos para impressão 3D Após a mistura por extrusão, os materiais foram plastificados em extrusora rosca simples da AX Plásticos Máquinas Técnicas LTDA, D=16mm e L/D=26, com o perfil de temperatura de 210/220/220 ºC do funil de alimentação até a matriz do tipo furo para obtenção de filamento para impressão 3D. Após a produção, o diâmetro dos filamentos foi aferido com o auxílio de um paquímetro em diferentes pontos, visando à obtenção de filamentos com diâmetro próximo ao padrão comercial de 1,75 mm. Os valores obtidos foram calculados e o valor médio para as formulações PPr/OMMT (100/0), (100/1), (100/3) e (100/5), respectivamente, foram de: 1,90 mm, 1,82 mm, 1,87 mm e 1,80 mm. III) Impressão dos corpos de prova Os filamentos produzidos foram utilizados na confecção de corpos de prova (CP’s) do tipo 1, seguindo a norma ASTM D638, em uma impressora Creality do

modelo K2 Plus Combo. Como padrão de impressão foi utilizado um bico de 0,4 mm aquecido em 250 ºC, a superfície de impressão foi uma mesa de vidro, a densidade de preenchimento de 100% padrão superior/inferior do tipo linha com ângulo de varredura de 45° à necessidade de deposição em baixa velocidade (15 a 20 mm/s), o tempo de ciclo médio para a conclusão de cada corpo de prova foi de aproximadamente 3 horas. A temperatura da mesa ficou em 60ºC, com intuito de manter o adesivo acrílico em estado sólido mantendo a impressão estabilizada. Por fim, a temperatura da câmara ficou em 60ºC, para reduzir o gradiente térmico e minimizar o choque no resfriamento do material, dificultando o empenamento natural do PPr. IV) Caracterização do nanocompósito polimérico A avaliação dos aspectos visuais foi realizada por meio de uma câmera digital, mantendo a luminosidade e distância focal fixa, para capturar imagens digitais dos pellets, filamentos e dos corpos de provas. A morfologia da região de fratura dos corpos de prova impressos foi avaliada por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Hitachi e modelo TM-3000. As propriedades mecânicas foram avaliadas por meio de ensaios mecânicos sob tração utilizando um equipamento da marca Shimadzu AG-X, com uma taxa de deslocamento de 1mm/min e uma célula de carga de 300 kN, de acordo com ASTM D638. As propriedades físicas foram avaliadas por meio da difração de raios X que foi realizada utilizando em um difratômetro da Shimadzu, modelo XRD-7000, com radiação CuKα (λ = 1,5418 Å) e passo de 1º(2θ)/min. O ensaio será realizado na faixa angular (2θ) de 2,5 a 10º.

Resultados e Discussões

Durante a produção dos filamentos foram observadas algumas limitações no controle do diâmetro, principalmente devido às variações durante a saída do material da extrusora de rosca dupla. Os diâmetros médio obtidos foram 1,90 mm, 1,82 mm, 1,87 mm e 1,80 mm para as formulações PPr/OMMT (100/0), (100/1), (100/3) e (100/5), respectivamente. Na Fig. 1-a, podemos observar no aspecto visual das mistura que houve um esverdeamento conforme o aumento da % em massa da OMMT era incorporado à matriz polimérica. Já na Figura 1-b, observa-se o aspecto visual dos filamentos produzidos na mono-rosca, onde é possível perceber que houve melhora na estabilidade dimensional em termos de tamanho. Na Fig. 2 é possível observar as linhas de impressão dos corpos de prova tipo 1 ficando evidente que a impressão de maneira adequada, entretanto, em todas as formulações no final houve uma pequena falha de impressão devido ao filamento não estar totalmente adequado permitindo esse aspecto visual mais, e conforme o aumento do OMMT, foi diminuindo o empenamento do material. Na Fig. 3 fica mais evidente, devido ao ângulo da câmera, reforçando a afirmação anterior, onde, houve melhoras significativas no empenamento do material ao aumentar a % em massa do OMMT no compósito polimérico, é necessário destacar que a base ficou altamente brilhante devido a fita utilizada para permitir a adesão do corpo de prova na mesa de impressão, tendo um contraste gigante com a outra face dos CP’s. Conforme as Figs. (4 a 7), as micrografias das superfícies de fratura mostram indícios de alterações na morfologia e no comportamento de deformação do PPr com a incorporação da OMMT, conforme o aumento de % em massa de OMMT, há fragmentos brancos e cinzas onde, provavelmente, são as partículas de OMMT. Esse comportamento mecânico na fratura é compatível com estudos MATA-PADILLA[7] que observaram que o aumento acima de 1% de massa pode influenciar a deformação e a fratura do PPr, principalmente em maiores concentrações de argila, podendo obter uma fratura característica de escoamento por cisalhamento. Em corpos de prova de

PP/MMT produzidos por FFF, a presença da argila e de vazios entre as camadas também PODE influenciar o comportamento mecânico e a fratura do material[7] Na Fig. 8 é possível observar os resultados do ensaio de tração dos CP's impressos. Na Fig. 8-a verificou-se que a incorporação de 1 e 3% em massa de OMMT promoveu o aumento da resistência máxima em relação ao PPr, enquanto a adição de 5% em massa resultou na redução dessa propriedade. Para o módulo de elasticidade (Fig. 8-b), foram observadas apenas pequenas variações entre as formulações. Em relação ao alongamento (Fig. 8-c), observa-se que o aumento proporcional com a incorporação da OMMT, sendo o maior valor obtido para a composição com 5%. Silva [8] e [9], ao avaliar essas propriedades para as mesmas formulações, por moldagem por injeção, também observou redução da resistência para a composição com 5% de OMMT, porém obteve o maior módulo para 3% e o maior alongamento para 1%. As diferenças observadas podem estar relacionadas ao método de processamento, uma vez que os corpos de prova deste trabalho foram produzidos por deposição sucessiva de filamentos. Na Fig. 9 são apresentados os difratogramas de raios X do PPr e das formulações contendo OMMT. A presença de alterações na região característica da OMMT indica que a incorporação da argila promoveu modificações estruturais nos nanocompósitos. Silva [9] (2023), ao estudar essas mesmas formulações, observou alterações na distância interplanar da OMMT após sua incorporação ao PPr, sendo o maior espaçamento observado para a formulação contendo 1% de OMMT. Para as formulações contendo 3 e 5%, a autora identificou a permanência de picos relacionados à argila, indicando uma dispersão parcial das lamelas na matriz polimérica.

Conclusão

Conclui-se que por meio desse trabalho foi possível produzir filamentos de PPr e PPr/OMMT e utilizá-los na impressão de corpos de prova do tipo I, com diâmetros médios entre 1,80 e 1,90 mm. Durante a produção dos CP's o uso de mesa e câmara aquecidas contribuiu para reduzir o empenamento durante a impressão. A incorporação da OMMT influenciou as propriedades mecânicas, com maiores resistências para as formulações contendo 1 e 3% e maior alongamento para 5%, enquanto o módulo de elasticidade apresentou pequenas variações. Já as análises de MEV e DRX indicaram alterações morfológicas e estruturais. De modo geral, os resultados demonstraram a possibilidade de utilização do PPr/OMMT na produção de filamentos e peças por impressão 3D, embora sejam necessários ajustes no processamento para melhorar o controle dimensional dos filamentos e a estabilidade da impressão.

Referências

[1] CALLISTER: Ciência e Engenharia de Materiais - William D. Callister, Jr. - 5ª Ed. [2] Kechagias JD. Materials for Additive Manufacturing. AIMS Mater Sci. 2022;9(6):785–90. [3] RABELLO: Estrutura e propriedade de polímeros - Marcelo [4] Comadre, M.J., Sy, J.A., Celorico, J.R., Collera, A.K., Margarito, M.T., & Basilia, B.A. (2022). Printability and Warpage Evaluation of Polypropylene/Nano Precipitated Calcium Carbonate Composite Prepared by Extrusion-Based 3D Printing. Materials Science Forum, 1066, 99 - 104. [5] Jahromi FT, Nikzad M, Prasad K, et al. Additive manufacturing of polypropylene micro and nano composites through fused filament

fabrication for automotive repair applications. Polym Adv Technol. 2023; 34(3): 1059-1074. doi:10.1002/pat.5952 [6] Zander NE, Gillan M, Burckhard Z, Gardea F. Recycled polypropylene blends as novel 3D printing materials. Addit Manuf. 2019; 25: 122-130. doi:10.1016/j.addma.2018.11.009 [7]MATA-PADILLA, José M.; ÁVILA-ORTA, Carlos A.; MEDELLÍN-RODRÍGUEZ, Francisco J.; VALDÉZ-GARZA, Janet A.; TORRES-MARTÍNEZ, Adriana. Study of fracture behavior of polypropylene/MWCNT and polypropylene/m-MMT nanocomposites by small angle X-ray scattering (SAXS). MRS Online Proceedings Library, v. 1371, p. 75–80, 2012. DOI: 10.1557/opl.2012.163. [8] SILVA, Alice da Costa. Processamento de polipropileno de garrafões de água mineral com argila montmorilonita objetivando aplicações técnicas, 2022. [9] SILVA, Alice da Costa. Estudo microrreólogico de PP reciclado com argila montmorilonita e anidrido maleico, 2023.

Anexos

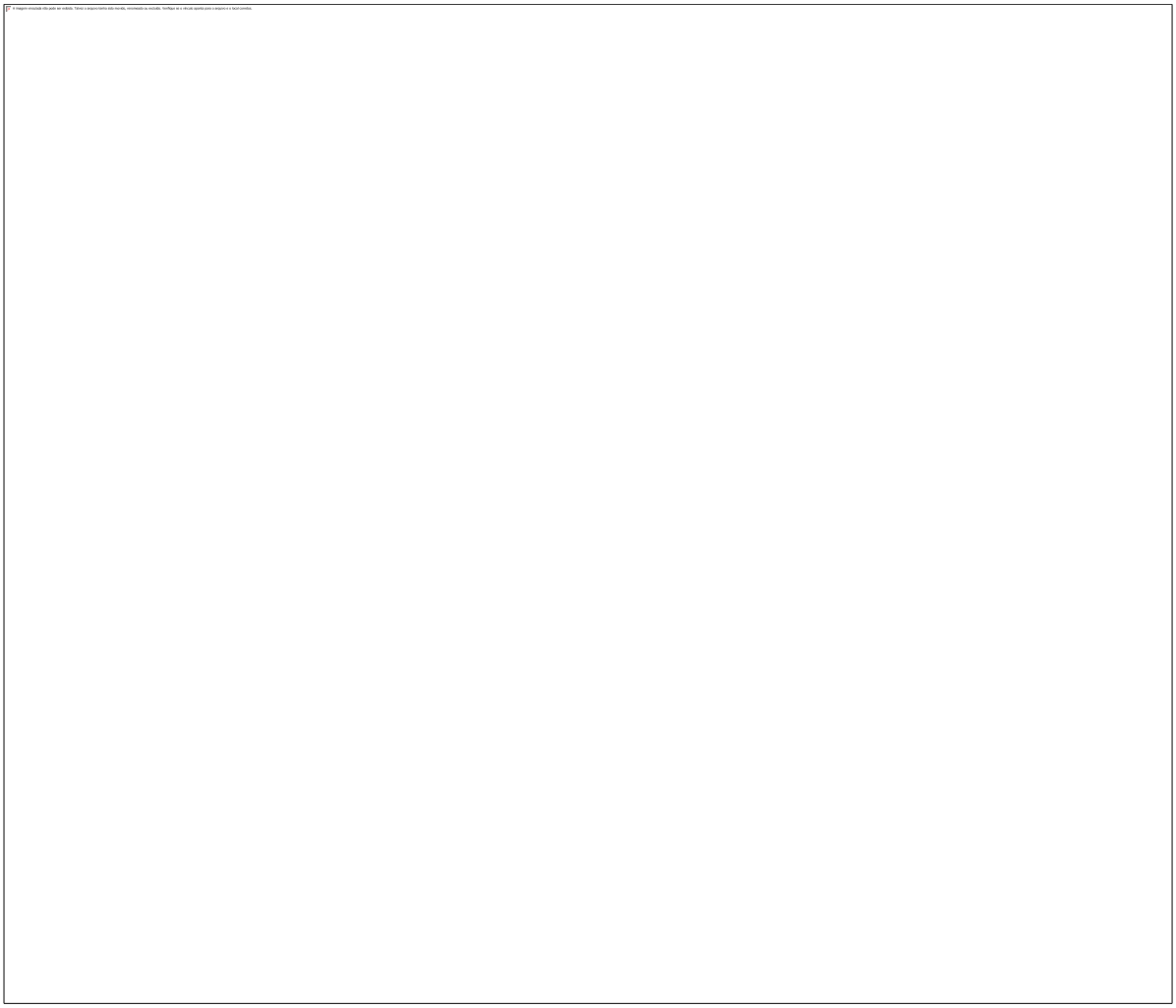


Figura 1 : Imagens do material em pellets e Filamentos PPr + OMMT produzidos



Figura 2: Corpos de prova impressos



Figura 3: Corpos de prova impressos II

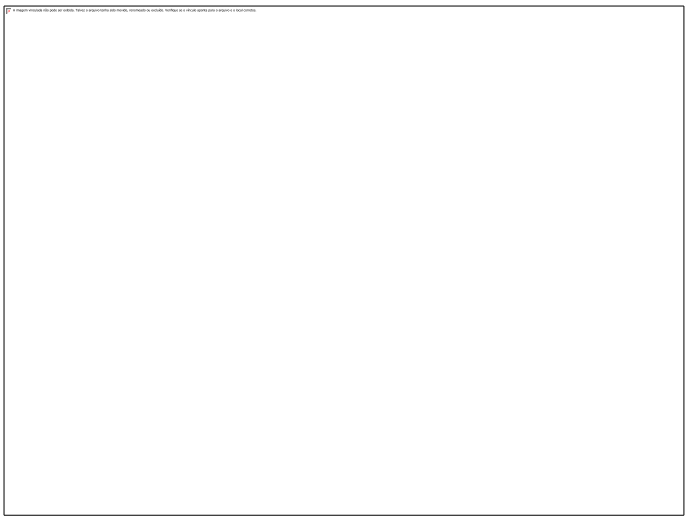


Figura 4: Microscopia do PPr/OMMT(100/0)

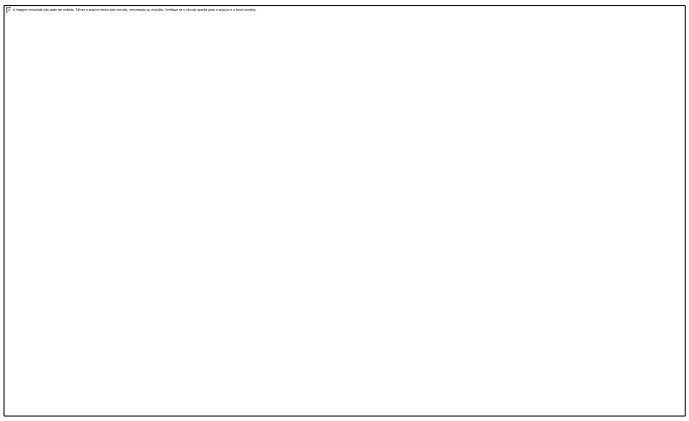


Figura 5: Microscopia do PPr/OMMT(100/1)

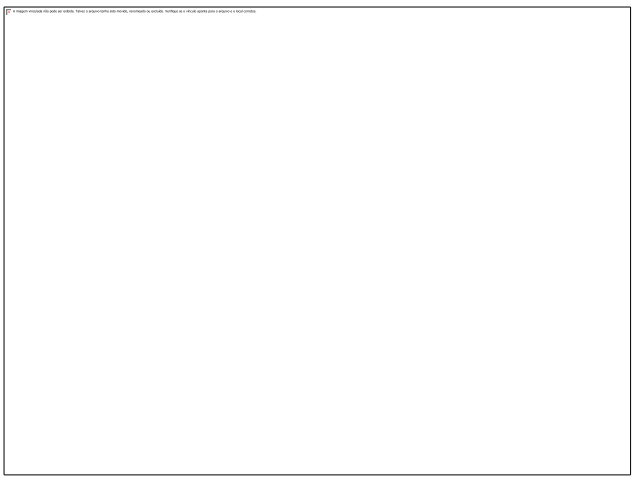


Figura 6: Microscopia do PPr/OMMT(100/3)

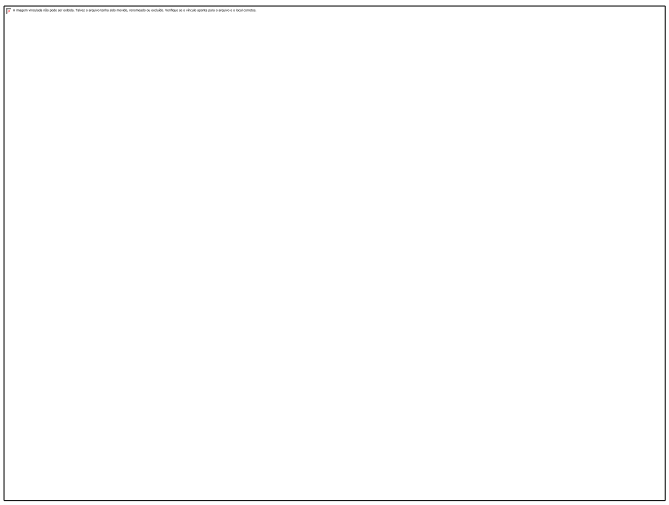


Figura 7: Microscopia do PPr/OMMT(100/5)



Figura 8: Resultado do Ensaio de Tração

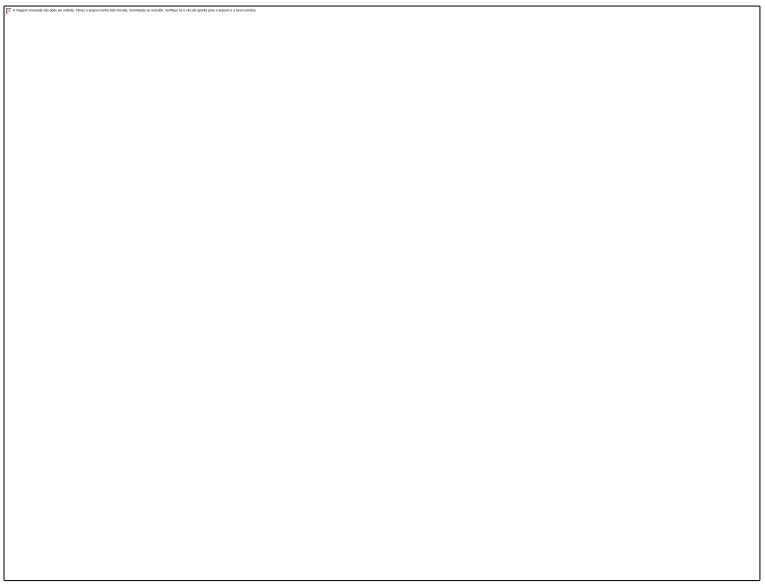


Figura 9: DRX

CÓDIGO: ET0368

AUTOR: JOAO MARCELO SOARES DA CUNHA

COAUTOR: EVERALDO SILVINO DOS SANTOS

COAUTOR: ISABELA OLIVEIRA COSTA

ORIENTADOR: NATHALIA SARAIVA RIOS

TÍTULO: Otimização da Imobilização da Lipase B de Candida antarctica em Sabugo de Milho Oxidado: Influência do Sistema-Tampão e Modificações Adicionais

Resumo

A imobilização enzimática representa uma estratégia interessante para viabilizar o uso industrial de biocatalisadores, aumentando sua estabilidade térmica e permitindo reutilizações sucessivas. Neste trabalho, a lipase B de Candida antarctica (CALB) foi imobilizada em sabugo de milho pré-tratado com NaOH e ativado com periodato de sódio (500 µmol/mL), gerando 488,62 µmol/g de grupos aldeídos. Avaliou-se a influência de diferentes sistemas-tampão (carbonato pH 10,2, fosfato pH 7,0 e Tris-HCl pH 7,0), sendo o derivado em tampão fosfato (SMA-500-CALB-7-FOSF) o mais eficiente, apresentando rendimento de imobilização de 57,51 %, atividade relativa de 104,45 % e atividade retida de 35,40 U/g após lavagem com 250 mL de água destilada. Na tentativa de otimização, o biocatalisador foi submetido a pós-incubação alcalina (pH 10,2) e recobrimento com polietilenoimina (PEI a 10 % m/v). Nos ensaios de estabilidade térmica a 60 °C em tampão Tris-HCl (50 mM), o derivado recoberto com PEI 10 % exibiu a maior estabilidade residual ao longo do tempo, sugerindo que a camada polimérica atua como blindagem macromolecular contra o desdobramento térmico. Os resultados demonstram a viabilidade do sabugo de milho funcionalizado como suporte renovável, eficiente e de baixo custo para bioprocessos.

Palavras-chave: Imobilização Enzimática, CALB, Sabugo de Milho, Periodato de Sódio.

TITLE: Optimization of Candida Antarctica Lipase B Immobilization on Oxidized Corn Cob: Influence of Buffer System and Additional Modification

Abstract

Enzyme immobilization represents an interesting strategy for industrial biocatalysis, enhancing thermal stability and enabling continuous reuse. In this study, Candida antarctica lipase B (CALB) was covalently immobilized on corn cob biomass pretreated with NaOH and activated with sodium periodate (500 µmol/mL), yielding 488.62 µmol/g of aldehyde groups. The influence of buffer systems (carbonate pH 10.2, phosphate pH 7.0, and Tris-HCl pH 7.0) was investigated, with the phosphate system (SMA-500-CALB-7-FOSF) achieving the best performance (57.51 % immobilization yield, 104.45 % relative activity, and 35.40 U/g after 250 mL washing). To enhance derivative properties, alkaline post-incubation (pH 10.2) and polyethyleneimine coating (PEI 10 % w/v) were evaluated. In thermal stability assays at 60 °C in Tris-HCl buffer (50 mM), the derivative coated with 10 % PEI exhibited superior residual activity retention, demonstrating that the cationic Polymer network provides structural stabilization against thermal unfolding. These findings confirm the potential of functionalized corn cob as a sustainable, low-cost carrier for industrial enzymatic reactions.

Keywords: Enzyme Immobilization, CALB, Corn Cob Biomass, Sodium Periodate.

Introdução

As lipases catalisam uma ampla gama de reações de bioconversão, tornando-se enzimas de escolha para diversas aplicações industriais [1]. No entanto, as enzimas livres frequentemente apresentam limitações, como baixa estabilidade operacional e dificuldade de recuperação [2]. O uso de enzimas imobilizadas ganhou relevância significativa na biotecnologia industrial, uma vez que a imobilização aumenta a estabilidade catalítica, permite a reutilização do biocatalisador em múltiplos ciclos de reação e facilita a separação produto-catalisador [3]. Além disso, a imobilização proporciona maior controle operacional do processo, resultando em maior eficiência e viabilidade econômica em escala industrial [3].

Resíduos lignocelulósicos, como o sabugo de milho, representam materiais abundantes, renováveis e de baixo custo que podem ser usados como suportes para imobilização de enzimas [4]. O pré-tratamento alcalino modifica a estrutura da biomassa ao remover parcialmente a lignina e a hemicelulose, reduzindo a cristalinidade da celulose, aumentando a área superficial e a porosidade e expondo grupos hidroxila e outros grupos funcionais reativos que favorecem a ligação da enzima [5].

A lipase B de Candida antarctica (CALB) destaca-se entre os biocatalisadores comerciais por sua estabilidade e alta eficiência em reações de esterificação e hidrólise seletiva [6]. Contudo, a eficiência da sua imobilização covalente em matrizes lignocelulósicas requer etapas estratégicas de funcionalização da superfície. Nesse contexto, a oxidação branda de dióis vicinais por periodato de sódio gera grupos aldeídos no suporte, capazes de reagir covalentemente com os resíduos de aminoácidos da enzima [7-8].

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo otimizar a imobilização da Lipase B de Candida antarctica (CALB) em biomassa de sabugo de milho pré-tratada e ativada com periodato de sódio, investigando a influência de diferentes sistema-tampão e estratégias de estabilização pós-imobilização na atividade e termoestabilidade do biocatalisador.

Metodologia

2.1. Pré-tratamento da Biomassa Lignocelulósica

O sabugo de milho foi submetido a pré-tratamento alcalino na proporção de 1:10 (m/v) em solução de NaOH a 2 % (m/v) e autoclavado a 121 °C por 1 h [9]. A fração sólida foi lavada com água destilada até a neutralização do pH [9]. Antes de ser submetida ao processo de imobilização, cada biomassa foi incubada nos seus determinados tampões.

2.2. Ativação da Biomassa Lignocelulósica

A biomassa pré-tratada (SMA) foi oxidada em solução de periodato de sódio (NaIO4, 500 µmol/mL) na proporção de 1:20 (m/v), sob agitação constante por 5 h ao abrigo da luz [10]. A suspensão foi centrifugada; o sólido foi lavado, seco e armazenado a 4 °C, e o sobrenadante reservado para quantificação.

2.3. Quantificação dos Grupos Aldeídos Gerados

A determinação da densidade de grupos aldeídos incorporados à matriz foi realizada de acordo com a metodologia adaptada de Guisán (1988). A análise baseia-se no consumo indireto de periodato no sobrenadante da reação de oxidação. O periodato residual (IO4-) reage com iodeto de potássio (KI) para a formação de iodo (I2), o qual é quantificado por espectrofotometria UV-Vis em comprimento de onda pré-selecionado, ajustado para que a absorbância da solução reacional inicial (Abs_padrão) apresente valor próximo a 0,7.

A concentração de grupos aldeídos gerados por grama de suporte CCHO foi determinada segundo a Equação 1:

$$C_{CHO}\ (\mu mol/g) = 2 * C_{IO4-,0}(\mu mol/g) * (1 - Abs_{amostra}/Abs_{padrão}) \quad (1)$$

Onde C_{CHO} é a concentração de grupos aldeídos gerados por grama de biomassa (µmol/g), $C_{IO4-,0}$ é a concentração inicial da solução de periodato de sódio por grama de biomassa (µmol/g), $Abs_{amostra}$ é a absorbância da solução após 2 min de reação com KI e $Abs_{padrão}$ é a absorbância da solução controle de periodato sem contato com a biomassa.

2.4. Determinação da Atividade Enzimática

A atividade catalítica foi determinada pela hidrólise do p-nitrofenil butirato (pNPB, dissolvido em acetonitrila) a 25 °C e pH 7,0 por espectrofotometria UV-Vis (348 nm), adaptada de Lombardo e Guy (1981). Uma unidade de atividade (U) foi definida como a quantidade de enzima que libera 1 µmol de p-nitrofenol por 1,5 min [11]. Monitoraram-se a enzima solúvel inicial (branco), a suspensão e o sobrenadante para quantificar a eficiência de imobilização e a atividade retida no suporte.

2.5. Parâmetros de Imobilização

A atividade da enzima solúvel e imobilizada (U/mL ou U/g, respectivamente) foi determinada pela diferença entre o valor obtido para a amostra e o valor da autohidrólise do substrato, multiplicado pelo fator da curva de calibração do p-NPB (Fc) em µmol/(mL.abs), volume de reação (Vr) em mL e diluição (D), sendo ao fim dividido pelo volume da amostra (Va) em mL e tempo de reação em minutos, de acordo com a Equação (2):

$$\text{Atividade (U/mL)} = ((Abs_{amostra} - Abs_{autohidrolise}) * Fc * Vr * D)/Va * Tempo \quad (2)$$

Para enzima imobilizada, a diferença reside na divisão pela massa de enzima imobilizada utilizada para realizar a medida, conforme Equação 3:

$$\text{Atividade (U/mL)} = ((Abs_{amostra} - Abs_{autohidrolise}) * Fc * Vr * D)/\text{Massa imobilizada} * Tempo \quad (3)$$

O rendimento de imobilização foi determinado pela diferença entre a atividade inicial da solução enzimática e a atividade do sobrenadante, em relação a atividade inicial, demonstrado na Equação (4).

$$\text{Rendimento (\%)} = ((Ativ._{Inicial} - Ativ._{sobrenadante})/Ativ._{Inicial}) * 100 \quad (4)$$

2.6. Modificações no Biocatalisador

O biocatalisador de melhor desempenho (SMA-500-CALB-7-FOSF) foi submetido a três estratégias de modificação:

Incubação Alcalina (M1): Após a etapa de imobilização por 24 h em tampão fosfato de sódio, a pH 7 5 mM (Etapa 1), o biocatalisador lavado foi incubado em tampão carbonato de sódio 5 mM, a pH 10,2, por 18 h a 25 °C (Etapa 2).

Tratamento Com PEI a 10% Seguido de Incubação Alcalina (M2): Após 24 h de imobilização em pH 7,0 5 mM e lavagem (Etapa 1), o derivado foi mantido em contato com uma solução de polietilenoimina (PEI) a 10 % (m/v) por 18 h a 4 °C (Etapa 2). Subsequentemente, o material foi transferido e incubado em pH 10,2 por 18 h a 25 °C (Etapa 3).

Modificação da Enzima Livre Com PEI (M3): Alíquotas da enzima livre foram previamente incubadas em soluções de PEI nas concentrações de 0,05 % e 0,1 % (m/v), sob agitação constante em shaker, por 18 h a 4 °C. Em seguida, essa suspensão contendo a enzima modificada foi posta em contato com o suporte ativado com periodato para condução da imobilização durante 24 h a 4 °C.

2.7. Estabilidade térmica

Os biocatalisadores obtidos foram submetidos a um ensaio de inativação térmica visando comparar a resistência das enzimas imobilizadas em comparação as enzimas solúveis. Para este ensaio foi utilizado tampão Tris-HCl (50,0 mM, pH 7,0). Periodicamente, amostras foram coletadas para realizar medida da atividade, utilizando ρNPB como substrato. A atividade relativa utilizada como parâmetro neste ensaio foi calculada considerando a atividade inicial como 100% (Equação 5).

Atividade relativa (%) = ($Ativ._{Após\ xh}$/$Ativ._{Tempo\ 0h}$) * 100 (5)

A “atividade do tempo 0h” corresponde a atividade do imobilizado imediatamente ao início da incubação e a “atividade após x h” corresponde a atividade do imobilizado após o período de incubação.

As curvas relacionando a atividade relativa ao tempo foram construídas no software Origin 8.5, utilizando um modelo de desativação enzimática por Sadana e Henley (1987).

Outro parâmetro comparativo utilizado nessa análise foi o fator de estabilidade (FE), calculado de acordo com a Equação 6:

$FE = t_{1/2\ da\ enzima\ imobilizada}/t_{1/2\ da\ enzima\ solúvel}$ (6)

Resultados e Discussões

3.1. Análise dos Sistemas de Imobilização

Foram avaliados os efeitos de diferentes sistemas-tampão nos parâmetros de imobilização, com o intuito de identificar o biocatalisador com melhor desempenho quanto ao rendimento de imobilização, atividade relativa da suspensão e quantidade de grupos aldeídos gerados no suporte. Para isso, compararam-se os suportes sem ativação prévia e com ativação por periodato de sódio a 500 µmol/mL, sob os tampões carbonato de sódio em pH 10,2 (10,2-CARB), fosfato de sódio a pH 7 (7-FOSF) e Tris-HCl em pH 7 (7-TRIS), todos na concentração de 5 mM. Os dados obtidos estão compilados na tabela 1.

O biocatalisador SMA-500-CALB-10,2-CARB apresentou o valor mais expressivo de 120 ± 2,13 %, sugerindo um possível fenômeno de hiperativação da enzima após ligação covalente ou conformação favorável do sítio ativo provocada pelo pH alcalino. Esse tipo de aumento na atividade catalítica pode ser decorrente de modificações conformacionais favoráveis induzidas pelo suporte ou pelas condições de pH durante a imobilização, sendo especialmente favorecido em lipases devido à elevada flexibilidade estrutural de seu sítio ativo [12].

O melhor desempenho no rendimento de imobilização foi observado no derivado sem ativação SMA-CALB-7-FOSF, com um rendimento de 88,99 ± 7,04 %, seguido por SMA-CALB-7-TRIS, com rendimento de 72,08 ± 0,44%. Contudo, apesar da provável elevada quantidade de enzima adsorvida, esses sistemas sem ativação exibiram as menores atividades relativas, 15,57 % e 40,71 %, respectivamente, o que indica que a adsorção não covalente levou a impedimento estérico ou inativação conformacional [13-14].

O biocatalisador SMA-500-CALB-7-FOSF mostrou-se o mais equilibrado na etapa de imobilização, combinando um bom rendimento de imobilização, sendo de 57,51 %, e uma atividade próxima da inicial, com 104,45 ± 11,08 %.

Adicionalmente, foi avaliada a estabilidade e a capacidade de retenção da enzima imobilizada frente a lavagens consecutivas do biocatalisador, comparando-se volumes de 50 mL e 250 mL de água destilada. Os resultados de atividade catalítica do imobilizado após o procedimento constam na tabela 2.

O biocatalisador SMA-CALB-7-TRIS atingiu a maior atividade inicial após lavagem com 50 mL, 51,62 ± 9,33 U/g, mas perdeu atividade significativamente ao atingir 250 mL de lavagem, 18,27 ± 1,85 U/g, o que sugere forte dessorção enzimática devido à ausência de ligações covalentes.

O biocatalisador SMA-500-CALB-7-FOSF exibiu a maior atividade após 250 mL de lavagens, com valor de 35,40 ± 9,95 U/g, e manteve estabilidade excelente, de 33,08 U/g para 35,40 U/g, o que pode demonstrar que a fixação covalente foi resistente à remoção por fluxo de lavagem.

Os sistemas em tampão carbonato apresentaram atividades absolutas mais modestas, de 10,97 a 19,34 U/g, enquanto o SMA-500-CALB-7-TRIS sofreu queda acentuada de 16,06 para 8,13 U/g.

Com os resultados, o biocatalisador que apresentou o melhor desempenho foi o SMA-500-CALB-7-FOSF, logo, foi o escolhido para os próximos testes e modificações.

3.2. Métodos de Modificação do Biocatalisador

Após a seleção do biocatalisador SMA-500-CALB-7-FOSF como o de melhor desempenho global, foram avaliadas três estratégias de modificação visando aumentar a estabilidade e a retenção catalítica do derivado. Os valores de atividade enzimática obtidos ao longo de cada etapa e condição estão reunidos na tabela 3 e tabela 4.

A avaliação do método 1 demonstrou que a transferência do imobilizado para o meio alcalino por 18 h resultou em uma redução na atividade catalítica. Embora o pH alcalino favoreça a formação de ligações covalentes multipontuais adicionais entre os resíduos de lisina da enzima e os grupos aldeídos remanescentes do suporte, o tempo prolongado de exposição pode ter induzido rigidez conformacional excessiva ou inativação parcial da lipase [8].

No método 2, o recobrimento com PEI a 10 % (m/v) após imobilização gerou perda catalítica, caindo para 13,59 U/g após a subsequente incubação em tampão carbonato pH 10,2. Essa redução na atividade observada pode estar relacionada à presença da própria camada polimérica sobre as moléculas enzimáticas, a qual atua como uma barreira física adicional, dificultando o livre acesso do substrato ao sítio ativo da enzima. Além disso, a perda adicional pode estar associada à natureza reversível da adsorção iônica da PEI sobre a enzima [15]. Sob condições de pH elevado, o enfraquecimento dessas interações eletrostáticas pode ter induzido a dessorção do polímero, desfazendo o seu efeito protetor e deixando o biocatalisador exposto à inativação direta pelo meio alcalino [15].

No método 3, a avaliação da modificação prévia da enzima livre indicou forte dependência da concentração de PEI utilizada. Na menor concentração avaliada (0,05 %), a integridade catalítica foi substancialmente preservada, atingindo 20,52 ± 4,03 U/g. Em contrapartida, o aumento para 0,1 % acarretou uma redução expressiva na atividade para

7,77 ± 3,10 U/g. Esse decréscimo pode ser atribuído ao excesso de cadeias poliméricas catiônicas ao redor da enzima solúvel, gerando impedimento no acesso do substrato ao sítio catalítico ou induzindo distorções conformacionais antes da fixação ao suporte.

3.3. Análise da Estabilidade Térmica

Foram avaliadas as estabilidades térmicas da enzima solúvel e dos biocatalisadores SMA-500-CALB-7-FOSF (imobilização padrão), SMA-500-CALB-7-FOSF-M1 (incubação alcalina) e SMA-500-CALB-7-FOSF-M2 (tratamento com PEI 10 % m/v seguido de incubação alcalina). Os ensaios foram conduzidos a uma temperatura de 60 °C em tampão Tris-HCl (50 mM), e o comportamento da atividade relativa ao longo do tempo está apresentado na Figura 1.

A enzima solúvel e o derivado SMA-500-CALB-7-FOSF-M1 sofreram inativação térmica sob o estresse de 60 °C, perdendo a maior parte de sua atividade catalítica já nos primeiros instantes de incubação. No caso do biocatalisador SMA-500-CALB-7-FOSF-M1, a incubação prévia prolongada em meio alcalino provavelmente desestabilizou a estrutura conformacional da CALB, tornando-a tão susceptível ao colapso térmico quanto a forma não imobilizada.

O suporte ativado com periodato sem recobrimento polimérico exibiu uma resistência térmica intermediária, desacelerando a inativação nas primeiras horas quando comparado à enzima livre, o que confirma o papel protetor da fixação covalente ao suporte sólido.

O derivado tratado com PEI a 10 % (SMA-500-CALB-7-FOSF-M2) destacou-se com o melhor desempenho de estabilidade térmica a 60 °C, retendo os maiores percentuais de atividade residual ao longo de todo o tempo de ensaio.

Com os ensaios, foi possível calcular os tempos de meia-vida e fator de estabilidade. Com os valores, foi montada a tabela 5.

A CALB livre apresentou um tempo de meia-vida de 6,46 sob aquecimento a 60 °C, evidenciando a fragilidade de sua estrutura em temperaturas elevadas sem suporte sólido. O biocatalisador submetido apenas à pós-incubação em pH 10,2 (M1) sofreu desativação nos primeiros instantes, inviabilizando o ajuste cinético preciso de meia-vida.

A fixação covalente no sabugo de milho aumentou o tempo de meia-vida para 85,54 min, conferindo um fator de estabilidade de 13,24 vezes em comparação à enzima livre. Esse resultado evidencia o papel da imobilização no suporte sólido, que atua estabilizando a estrutura da enzima e retardando os processos de inativação térmica quando comparado à sua forma livre em solução.

O biocatalisador recoberto com PEI a 10 % (SMA-500-CALB-7-FOSF-M2) alcançou um tempo de meia-vida de 437,36 min, correspondendo a um fator de estabilidade de 67,70 vezes em relação à enzima livre. Esse aumento de estabilidade demonstra que a polietilenoimina atua ao redor da enzima, impedindo o desdobramento térmico e amortecendo o impacto direto da agitação térmica do meio sobre o centro ativo da lipase.

Conclusão

Neste estudo, a biomassa de sabugo de milho foi aproveitada com sucesso como suporte renovável para a imobilização covalente da lipase CALB após pré-tratamento alcalino e oxidação com periodato de sódio. Dentre os meios reacionais avaliados, o tampão fosfato a pH 7,0 forneceu o sistema de imobilização mais equilibrado, conjugando um rendimento de 57,51 %, mantendo atividade próxima da inicial (104,45 %) e fixação covalente estável resistente a lavagens exaustivas.

Embora o tratamento com PEI tenha introduzido limitações difusionais que reduziram ligeiramente a atividade aparente, esse recobrimento polimérico pode ter sido determinante para proteger a conformação catalítica frente à temperatura de 60 °C, conferindo ao derivado a maior estabilidade térmica entre todas as formulações. A biomassa lignocelulósica ativada associada ao recobrimento com polieletrólitos consolida-se, portanto, como uma plataforma biotecnológica eficiente, robusta e de baixo custo para aplicação em biocatálise heterogênea.

É importante ressaltar que o presente trabalho ainda se encontra em andamento e que caracterizações futuras serão realizadas para complementar a análise.

Referências

1. RAJENDRAN, A.; PALANISAMY, A.; & THANGAVELU, V.; Lipase Catalyzed Ester Synthesis for food Processing Industries. Brazilian Archives of Biology and Technology, v. 52, n.1, p. 20-219, 2009.

2. KHAN, M. R.; Immobilized enzymes: a comprehensive review. Bulletin of the National Research Centre, v, 45, p. 207, 2021.

3. ALMEIDA, C. S.; NETO, F. S.; SOUSA, P. da S.; AIRES, F. I. da S.; FILHO, J. R. de M.; CAVALCANTE, A. L. G.; JUNIOR, P. G. de S.; MELO, R. L. F.; & DOS SANTOS, J. C. S.; Enhancing Lipase Immobilization via Physical Adsorption: Advancements in Stability, Reusability and Industrial Applications for Sustainable Biotechnological Processes. ACS Omega, 9(47), 46698-46732, 2024.

4. DOS SANTOS, P. M.: BARUQUE, J. R.; DE SOUZA. L. R. K.; LEITE, S. G. F.; DO NASCIMENTO, R. P.; BORGES, C. P.; WOJCIESZAK, R.; & ITABAIANA, I. JR.; Corn Cob as a green Support for Lacase Immobilization: Application on Decolorization of Remazol Brilliant Blue R. International Journal of Molecular Sciences, 23(16), 9363, 2022.

5. SUN, Y.; CHENG, J.: Hydrolysis of Lignocellulosic Materials for Ethanol Production: A Review. Bioressource Technology, v. 83, p. 1-11, 2002.

6. PEIRCE, S.; MARCÍAS-PASCACIO, V. G.; RUSSO, M. E.; GUISÁN, J. M.; VIRGEN-ORTÍZ, J. J. Stabilization of Candida antarctica Lipase B (CALB) Immobilized on Octyl Agarose by Treatment with Polyethyleneimine (PEI). Molecules, v. 21, n, 6, p. 751, 2016.

7. GUISÁN, J. M. Aldehyde-agarose gels as activated supports for immobilization-stabilization of enzymes. Enzyme and Microbial Technology, v. 10, n. 6, p. 375-382, 1988.

8. MATEO, C.; PALOMO, J. M.; FERNADEZ-LORENTE, G.; GUISAN, J. M.; FERNANDEZ-LAFUENTE, R. Glyoxyl agarose: A fully inert and hydrophilic support for immobilization and high stabilization of proteins. Enzyme and Microbial Technology, v. 39, n. 2, p. 274-280, 2006.

9. RIBEIRO, V. T.; CAMPOLINA, A. C.; COSTA, W. A.; PADILHA, C. E. A.; FILHO, J. D. B. da C.; LEITÃO, A. L. O. de S.; ROCHA, J. da C.; SANTOS, E. S. dos. Ethanol Production from Green Coconut Fiber Using Sequential Steam Explosion and Alkaline Pretreatment. Biomass Conversion and Biorefinery, v. 14, p. 8579–8589, 2024.

10. SUN, B.; HOU, Q.; LIU, Z.; NI, Y. Sodium periodate oxidation of cellulose nanocrystal and its application as a paper wet strength additive. Cellulose, v. 22, p. 1135–1146, 2015.

11. RIOS, N. S.; MENDEZ-SANCHEZ, C.; ARANA-PEÑA, S.; RUEDA, N.; ORTIZ, C.; GONÇALVES, L. R.B.; FERNANDEZ-LAFUENTE, R.; Immobilization of lipase from Pseudomonas fluorescens on glyoxyl-octyl-agarose beads: Improved stability and reusability. BIOCHIMICA ET BIOPHYSICA ACTA-PROTEINS AND PROTEOMICS, v. 1867, p. 741-747, 2019.

12. Rafael. C. Rodrigues.; Ortriz, C.; Ángel Berenguer-Murcia.; Rodrigo, Torres.; Roberto, Fernández-Lafuente.; Modifying enzyme activity and selectivity by immobilization. Chem. Soc. Rev. 2013; 42 (15): 6290–6307. https://doi.org/10.1039/c2cs35231a

13. BARBOSA, O; ORTIZ, C.; BERENGUER-MURCIA, Á.; RODRIGUES, R. C.; FERNADEZ-LAFUENTE, R. Heterofunctional support in enzyme immobilization: from design to application. Chemical Society Reviews, v. 44, n. 24, p. 8762-8782, 2015.

14. MATEO, C.; PALOMO, J. M.; FERNANDEZ-LORENTE, G.; GUISAN, J. M.; FERNANDEZ-LAFUENTE, R. Improvement of enzyme activity, stability and selectivity via immobilization techniques, Enzyme and Microbial Technology, v. 40, n. 6, p. 1451-1463, 2007.

15. BOLIVAR, J. M.; ROCHA-MARTIN, J.; MATEO, C.; CAVA, F.; BERENGUER, J.; FERNANDEZ-LAFUENTE, R.; GUISAN, J. M.; Coating of Soluble and Immobilized Enzymes with Ionic Polymers: Full Stabilization of the Quaternary Structure of Multimeric Enzyme. Biomacromolecules. V. 10, n. 6, p. 742-747, 2009.

Anexos



Tabela 1: Parâmetros de imobilização dos biocatalisadores.

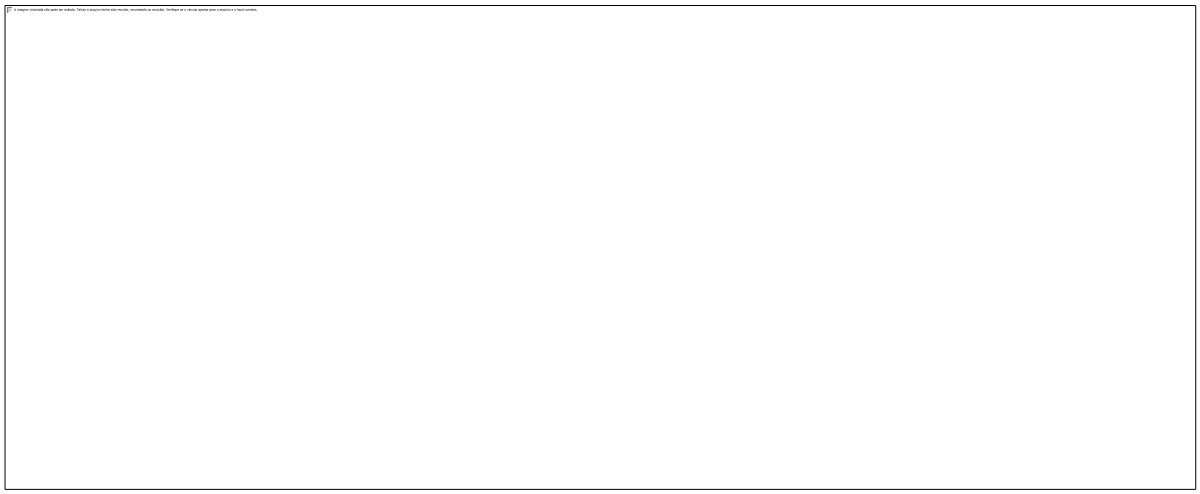


Tabela 2: Atividade catalítica dos imobilizados após lavagens.

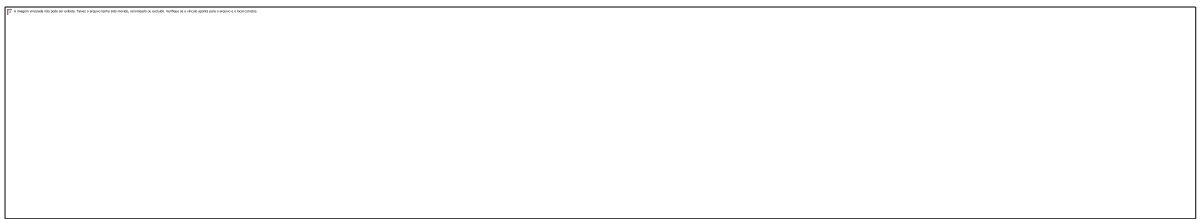


Tabela 3: Atividade catalítica do derivado SMA-500-CALB-7-FOSF submetido a incubação alcalina (M1) e tratamento com PEI a 10 % seguido de incubação Alcalina (M2).

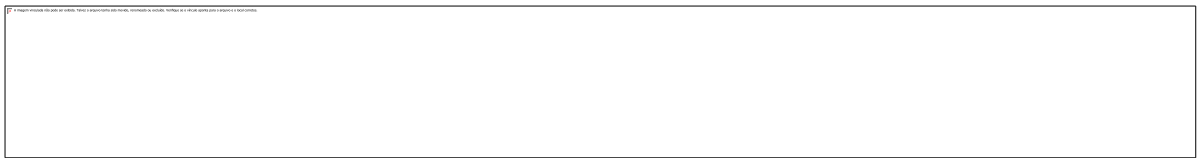


Tabela 4: Atividade catalítica da enzima livre modificada com PEI na condição de 0,05 % e 0,1% (M3).

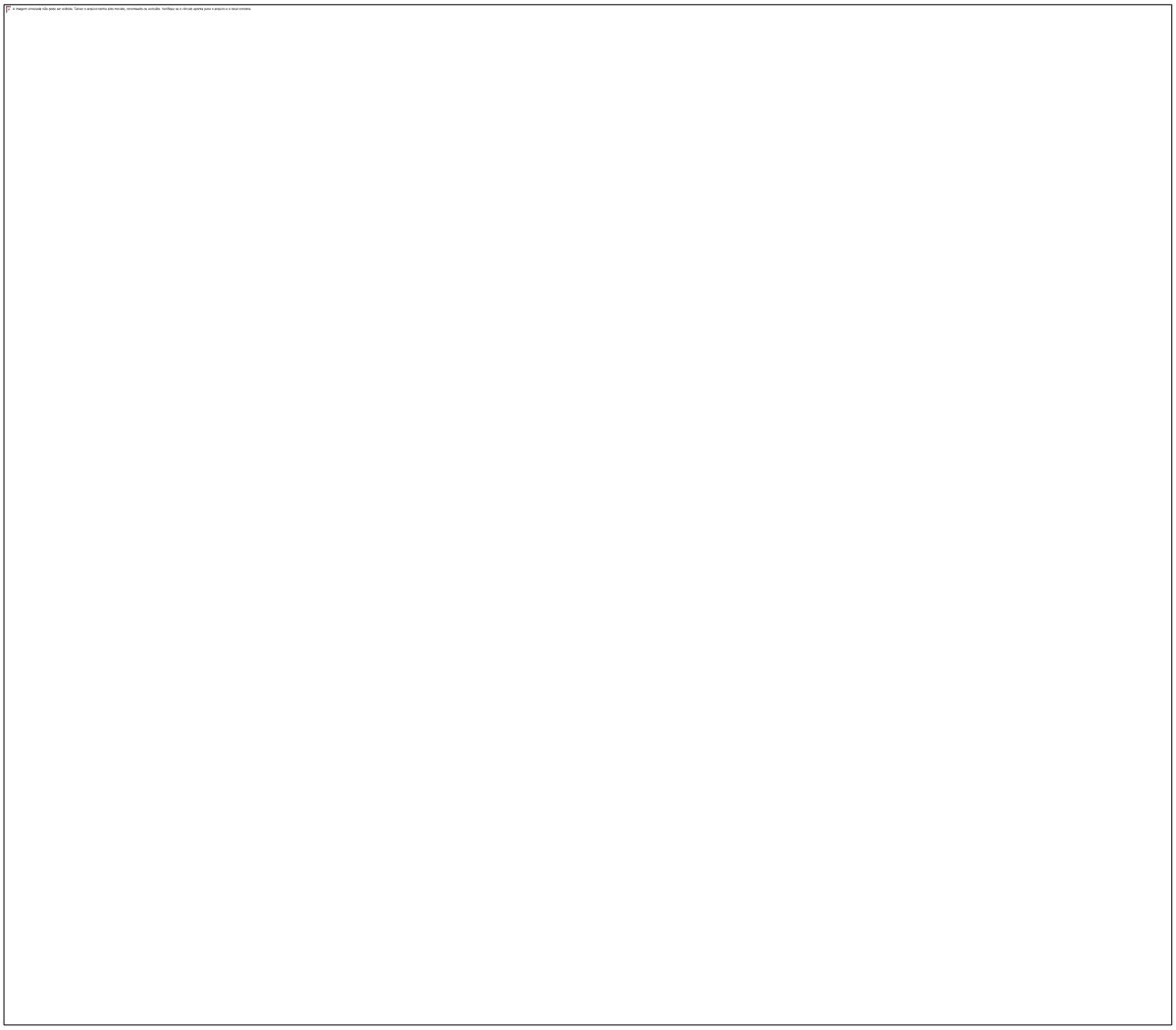


Figura 1: Perfil de estabilidade térmica da enzima solúvel e dos derivados imobilizados submetidos a diferentes tratamentos ao longo do tempo.

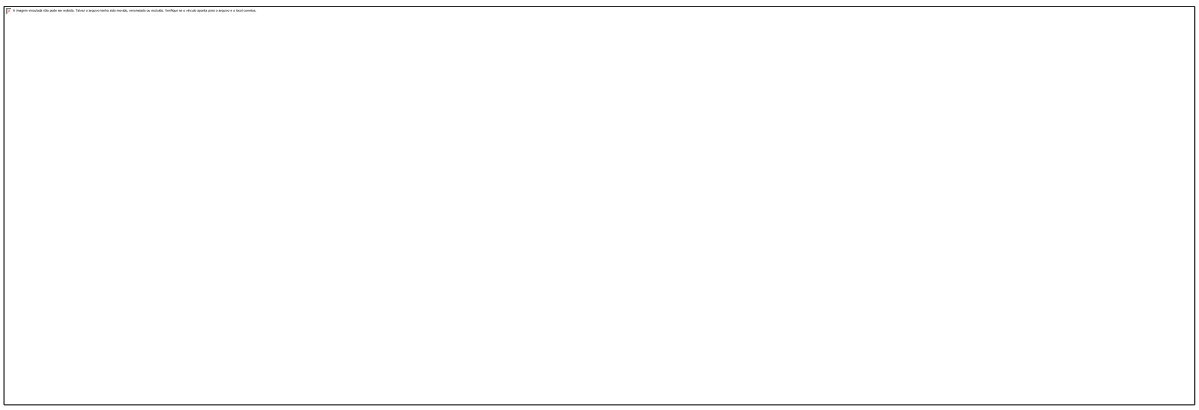


Tabela 5: Parâmetros cinéticos de inativação térmica da CALB livre e dos Biocatalisadores a 60 °C.

CÓDIGO: ET0386

AUTOR: FELLIPE NOGUEIRA MILOMEM

ORIENTADOR: IVANOVITCH MEDEIROS DANTAS DA SILVA

TÍTULO: Desenvolvimento e Investigação de uma Plataforma Web para Monitoramento de Modelos de IA e Visualização de Dados em Ambientes de Borda

Resumo

A computação na borda permite executar modelos de inteligência artificial próximos às fontes de dados, reduzindo a dependência de estruturas centralizadas e favorecendo aplicações em Internet das Coisas. Entretanto, a adoção prática dessas soluções exige mecanismos para acompanhar o comportamento dos modelos, os dados coletados e as condições operacionais dos dispositivos embarcados. Este trabalho investiga o desenvolvimento de uma plataforma Web integrada para visualização de dados e monitoramento de modelos de inteligência artificial executados em ambientes de borda, com atenção a aplicações distribuídas de interesse industrial e automotivo. A pesquisa combina revisão de literatura, análise de arquiteturas e padrões de comunicação, desenvolvimento incremental de software e validação experimental com dados reais ou simulados. A plataforma é concebida para organizar dashboards com métricas como tempo de inferência, consumo de energia, frequência de eventos e indicadores de funcionamento dos dispositivos. Espera-se contribuir para a supervisão de aplicações de inteligência artificial na borda, oferecendo uma interface acessível para interpretação dos dados, avaliação de desempenho e identificação de oportunidades de melhoria em sistemas distribuídos.

Palavras-chave: computação na borda. inteligência artificial. Internet das Coisas.

TITLE: Development and Investigation of a Web Platform for Monitoring AI Models and Data Visualization in Edge Environments

Abstract

Edge computing enables artificial intelligence models to run close to data sources, reducing dependence on centralized infrastructures and supporting Internet of Things applications. However, the practical adoption of these solutions requires mechanisms to monitor model behavior, collected data, and the operational conditions of embedded devices. This work investigates the development of an integrated Web platform for data visualization and monitoring of artificial intelligence models executed in edge environments, focusing on distributed applications of industrial and automotive interest. The research combines a literature review, analysis of architectures and communication patterns, incremental software development, and experimental validation with real or simulated data. The platform is designed to organize dashboards with metrics such as inference time, energy consumption, event frequency, and device operation indicators. The expected contribution is a more accessible supervision layer for edge artificial intelligence applications, supporting data interpretation, performance assessment, and the identification of improvement opportunities in distributed systems.

Keywords: edge computing. artificial intelligence. Internet of Things.

Introdução

A expansão da Internet das Coisas e dos sistemas distribuídos tem ampliado o uso de modelos de inteligência artificial em dispositivos próximos ao local onde os dados são produzidos. Nesse cenário, a computação na borda reduz a necessidade de enviar continuamente grandes volumes de dados para estruturas centralizadas, podendo contribuir para menor latência, maior autonomia e respostas mais adequadas às condições locais. O projeto de pesquisa ao qual este trabalho está vinculado investiga o uso de inteligência artificial generativa na borda, inicialmente com aplicações de interesse automotivo e com possibilidade de expansão para os setores industrial, de energias renováveis e agroindustrial. Além da eficiência dos modelos e dos algoritmos embarcados, sua adoção depende da capacidade de acompanhar o que ocorre durante a execução. É necessário observar as métricas de desempenho, os eventos gerados, os dados captados e as condições operacionais dos dispositivos. Uma plataforma Web de monitoramento pode funcionar como camada de supervisão, conectando os dados produzidos na borda aos pesquisadores, desenvolvedores e demais responsáveis por sua interpretação e manutenção. Assim, este trabalho propõe investigar e desenvolver uma plataforma Web integrada para visualização de dados e monitoramento de modelos de inteligência artificial executados em ambientes de borda. A pesquisa considera aspectos de arquitetura, comunicação, visualização, escalabilidade, usabilidade e eficiência, buscando produzir uma solução aplicada e acompanhada de análise crítica das decisões de projeto.

Metodologia

A pesquisa possui caráter exploratório e experimental, articulando investigação conceitual, desenvolvimento de software e validação prática. Inicialmente, será

realizada revisão de literatura e análise de estudos de caso sobre plataformas Web aplicadas a Internet das Coisas, computação na borda e monitoramento de sistemas embarcados. Em seguida, serão comparadas arquiteturas e padrões de comunicação para a integração entre dispositivos de borda, serviços de processamento e a camada Web, considerando requisitos de latência, escalabilidade, segurança e disponibilidade. A plataforma será desenvolvida de forma incremental, com componentes modularizados e decisões orientadas pelos requisitos de visualização e supervisão. Serão implementados dashboards para exibir dados operacionais e métricas dos modelos embarcados, incluindo tempo de inferência, consumo de energia, frequência de eventos e indicadores de funcionamento dos dispositivos. A validação será realizada com dados reais ou simulados, conforme a disponibilidade dos experimentos do projeto principal. Serão observados o desempenho da solução, a capacidade de atualização dos dados, o comportamento diante de falhas e a facilidade de uso da interface. Por fim, serão sistematizados os resultados, as limitações, as decisões de arquitetura e as possibilidades de evolução da plataforma em documentação técnica e científica.

Resultados e Discussões

Foi desenvolvida uma plataforma Web para apoiar o monitoramento de modelos de inteligência artificial e a visualização de dados produzidos em ambientes de borda. A implementação foi realizada com React, utilizado na construção da interface e na organização dos componentes visuais, e Vite, empregado como ferramenta de desenvolvimento e empacotamento da aplicação. Essa combinação permitiu estruturar a plataforma de forma modular, com separação entre os componentes de apresentação, os dados exibidos e as funcionalidades de interação.

A solução resultou em uma camada de supervisão capaz de organizar informações operacionais em uma interface Web, favorecendo a visualização de dados e o acompanhamento dos elementos associados à execução dos modelos. A utilização de componentes reutilizáveis facilita a evolução dos dashboards e a inclusão de novas métricas, como tempo de inferência, consumo de energia, frequência de eventos e indicadores de funcionamento dos dispositivos. A arquitetura adotada também cria uma base para integrar diferentes fontes de dados e adaptar a plataforma a aplicações industriais, automotivas e de Internet das Coisas.

Do ponto de vista da pesquisa aplicada, o desenvolvimento confirmou a viabilidade de utilizar tecnologias Web modernas para construir uma interface de monitoramento voltada a sistemas de borda. O uso de React favoreceu a composição incremental da interface e a atualização dos elementos exibidos, enquanto o Vite simplificou o ciclo de desenvolvimento e a preparação da aplicação para execução. Como limitação, a versão atual ainda depende da ampliação da validação experimental com cargas de dados e dispositivos representativos, bem como da medição sistemática de desempenho, escalabilidade, segurança e usabilidade. Assim, os resultados obtidos constituem uma base funcional para as próximas etapas de integração com os modelos embarcados e de avaliação quantitativa da plataforma.

Conclusão

O trabalho resultou no desenvolvimento de uma plataforma Web para monitoramento de modelos de inteligência artificial e visualização de dados em ambientes de borda, utilizando React e Vite. A implementação atendeu ao objetivo de construir uma camada de supervisão acessível e modular, capaz de organizar informações operacionais e apoiar a interpretação dos dados produzidos por sistemas distribuídos.

A experiência demonstrou que tecnologias Web modernas podem ser utilizadas para estruturar interfaces de monitoramento associadas à computação na borda, oferecendo flexibilidade para a criação de dashboards e para a incorporação gradual de novas métricas. Como trabalhos futuros, recomenda-se integrar a plataforma diretamente aos dispositivos e modelos do projeto principal, realizar testes quantitativos de latência, desempenho e escalabilidade, avaliar a usabilidade com usuários, ampliar os mecanismos de segurança e investigar a utilização da solução em diferentes cenários industriais e automotivos.

Referências

OLIVEIRA, Franklin; COSTA, Daniel G.; ASSIS, Flávio; SILVA, Ivanovitch. Internet of Intelligent Things: A convergence of embedded systems, edge computing, and machine learning. Internet of Things, v. 26, 2024, 101153.

RASCHKA, Sebastian. Build a Large Language Model (From Scratch). Manning, 2024. ISBN 978-1633437166.

DOAN, Ryan. Essential Guide to LLMOps. Packt Publishing, 2024. ISBN 978-1835887509.

OSMANI, Addy. Beyond Vibe Coding. O'Reilly Media, 2025. ISBN 979-8341634756.

ROBBINS, Jennifer. Learning Web Design. 6. ed. O'Reilly Media, 2025. ISBN 978-1098137687.

AGBONYIN, A.; REDDY, P.; JAKKANI, A. K. Utilizing internet of things (IoT), artificial intelligence, and vehicle telematics for sustainable growth in small and medium firms (SMEs). International Journal of Computer Engineering and Technology, v. 15, n. 2, p. 182–191, 2024.

DIAZ-DE-ARCAYA, J.; LÓPEZ-DE-ARMENTIA, J.; MIÑÓN, R.; OJANGUREN, I. L.; TORRE-BASTIDA, A. I. Large Language Model Operations (LLMOps): Definition and Lifecycle Management. In: 9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), 2024. DOI: 10.23919/SpliTech61897.2024.10612341.

CÓDIGO: ET0393

AUTOR: FELIPE ROCHA SILVA

COAUTOR: NICHOLAS WALLACE LOPES

ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO TRABUCO DOREA

TÍTULO: Controladores para Seguimento de Referência em Sistemas com Atraso sob Restrições

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados de uma pesquisa de iniciação científica voltada ao desenvolvimento de estratégias de controle para sistemas lineares sujeitos a restrições operacionais e atraso na entrada. A investigação teve início com o estudo da teoria de conjuntos invariantes poliédricos aplicada ao problema regulatório, evoluindo gradualmente para a incorporação de restrições de estado e controle, síntese simultânea por programação bilinear, condições de invariância dependentes do atraso e, finalmente, o problema de seguimento de referência. O ápice da pesquisa consistiu na formulação e validação de uma abordagem que integra todas essas camadas: um controlador do tipo PI com ação feedforward, projetado por otimização bilinear, capaz de garantir o rastreamento assintótico de uma referência constante em um sistema discreto com retardo na entrada, respeitando simultaneamente restrições poliédricas no estado e limites na entrada de controle. A chave metodológica reside em uma transformação de modelo que desacopla modos dependentes e independentes do atraso, permitindo condições de invariância que incorporam explicitamente a magnitude do retardo, reduzindo o conservadorismo das abordagens clássicas. Resultados numéricos em uma planta de tanques acoplados demonstram a eficácia da proposta.

Palavras-chave: Conjuntos invariantes. Atraso. Seguimento de referência. Restrições.

TITLE: Constrained Reference Tracking Controller for Linear Systems with Delayed Input

Abstract

This work presents the results of a scientific initiation research focused on developing control strategies for linear systems subject to operational constraints and input delay. The investigation began with the study of polyhedral invariant set theory applied to the regulatory problem, gradually evolving towards the incorporation of state and control constraints, simultaneous synthesis via bilinear programming, delay-dependent

invariance conditions, and finally the reference tracking problem. The culmination of the research consisted in formulating and validating an approach integrating all these layers: a PI-type controller with feedforward action, designed through bilinear optimization, capable of guaranteeing asymptotic tracking of a constant reference in a discrete-time system with input delay, while simultaneously respecting polyhedral state constraints and control input bounds. The methodological key lies in a model transformation that decouples delay-dependent and delay-independent modes, enabling invariance conditions that explicitly incorporate the delay magnitude, thereby reducing the conservatism of classical approaches. Numerical results on a coupled-tank plant demonstrate the effectiveness of the proposal.

Keywords: Invariant sets. Time delay. Reference tracking. Constraints.

Introdução

Sistemas dinâmicos presentes em aplicações industriais e de engenharia estão invariavelmente sujeitos a limitações físicas e operacionais. Atuadores possuem faixas de operação finita, variáveis de processo não podem ultrapassar determinados limiares por razões de segurança, e tanques ou reservatórios têm capacidade limitada. Matematicamente, essas limitações traduzem-se em restrições lineares sobre os estados e as entradas de controle. Paralelamente, fenômenos de transporte, propagação e processamento computacional introduzem atrasos entre o instante em que uma ação de controle é calculada e o instante em que ela efetivamente atua sobre a planta. A combinação de restrições e atrasos torna o projeto de controladores significativamente mais desafiador.

A teoria de conjuntos positivamente invariantes oferece um arcabouço natural para tratar restrições em sistemas dinâmicos. Um conjunto invariante é uma região do espaço de estados da qual as trajetórias não escapam, desde que a condição inicial pertença a essa região. Quando tal conjunto está contido na região definida pelas restrições, a satisfação destas é garantida para todo instante futuro. Para sistemas sem atraso, essa teoria é bem estabelecida. Contudo, a presença de retardo na entrada transforma o problema: as condições para invariância são praticamente impossíveis de atingir.

Abordagens clássicas de invariância para sistemas com atraso utilizam condições independentes do retardo, tratando o termo atrasado como uma perturbação genérica a ser absorvida. Essas condições tendem a ser excessivamente conservadoras, pois exigem estabilidade para qualquer valor possível de atraso. Avanços recentes propuseram condições dependentes do atraso por meio de transformações de modelo que desacoplam os modos dependentes e independentes do retardo, permitindo incorporar explicitamente o tamanho do atraso na análise.

No âmbito desta pesquisa de iniciação científica, o trabalho seguiu uma progressão natural: partiu-se da compreensão do problema regulatório básico via poliedros invariantes, avançou-se para a incorporação de restrições de estado e controle, introduziu-se a síntese simultânea por programação bilinear, incorporaram-se condições dependentes do atraso e, por fim, estendeu-se a formulação ao problema de seguimento de referência. O resultado final integra todos esses elementos em uma formulação unificada.

O objetivo central foi desenvolver e validar uma metodologia de projeto de controladores que garanta o rastreamento de referência em sistemas lineares discretos com atraso na entrada, respeitando simultaneamente restrições poliédricas, por meio da síntese conjunta do ganho de controle e de um poliedro invariante via otimização bilinear.

Metodologia

A metodologia desenvolvida ao longo da pesquisa pode ser organizada em camadas progressivas, cada uma incorporando um novo aspecto ao problema de controle.

1. Fundamentos de invariância poliédrica. O ponto de partida foi o estudo de conjuntos positivamente invariantes para sistemas lineares discretos sem atraso. Um poliedro $\Omega = \{\xi \mid F\xi \leq 1\}$ é positivamente invariante se, para toda condição inicial em Ω, a trajetória futura permanece em Ω. Condições necessárias e suficientes para essa propriedade foram estudadas e compreendidas no contexto regulatório, onde o objetivo é levar o estado à origem.

2. Incorporação de restrições e síntese bilinear. Em seguida, consideraram-se restrições lineares de estado ($Sx \leq 1$) e de controle ($-u_min \leq u \leq u_max$). A satisfação das restrições é garantida se o poliedro invariante estiver contido na região admissível, o que é verificado pelo Lema de Farkas Estendido. A síntese simultânea do controlador e do poliedro foi formulada como um problema de programação bilinear, no qual as variáveis de decisão incluem o ganho de controle, a matriz que define o poliedro e matrizes auxiliares não negativas.

3. Condições dependentes do atraso via transformação de modelo. Para sistemas com atraso d na entrada, o modelo em malha fechada assume a forma $\xi(k+1) = A\xi(k) + BG\xi(k-d)$. A abordagem clássica de invariância (D-invariância) não considera o valor de d, resultando em condições conservadoras. A transformação de modelo introduz uma matriz auxiliar K que reescreve o sistema de modo a distribuir o efeito do atraso ao longo de uma janela temporal estendida. Isso permite derivar condições de invariância nas quais o tamanho d aparece explicitamente, reduzindo o conservadorismo. As condições iniciais admissíveis são definidas em um intervalo estendido $[-d, 0]$ e devem ser consistentes com a dinâmica do sistema.

4. Formulação do seguimento de referência. O problema de rastreamento é convertido em um problema de regulação por meio de um modelo aumentado. O sinal de referência r(k) passa por um filtro de primeira ordem $\omega(k+1) = \delta\omega(k) + (1-\delta)r(k)$, suavizando transições. Uma ação integral é introduzida via $v(k+1) = v(k) + T(\omega(k) - Cx(k))$, garantindo erro nulo em regime permanente. O estado aumentado $\xi = [x^T, v, \omega]^T$ permite escrever o sistema de forma compacta, e a lei de controle $u(k) = [K_x, K_v, K_\omega]\xi(k)$ assume estrutura do tipo PI com feedforward.

5. Problema de otimização. Todas as condições de invariância, contenção do poliedro na região de restrições e satisfação dos limites de controle são reunidas como restrições de

um problema de otimização bilinear. A função objetivo minimiza um escalar γ que está associado ao tamanho do poliedro invariante, buscando maximizar a região de condições iniciais admissíveis. O problema é resolvido numericamente com o solver KNITRO, adequado para programação bilinear.

6. Exemplo numérico. A validação foi realizada sobre um modelo linearizado de uma planta de tanques acoplados (Quanser), discretizado com período T = 0,5 s, com atraso d = 2 e parâmetro de filtragem δ = 0,99. Restrições |x_i| ≤ 15, |v| <= 300, |w| <= 15 e |u| ≤ 4 foram impostas.

Resultados e Discussões

A resolução do problema de otimização bilinear para a planta de tanques acoplados, com taxa de contração λ = 0,9999, atraso d = 2 e parâmetro de filtragem δ = 0,99, resultou no seguinte ganho de controle:

G = [−0,0904 −0,0866 0,0051 0,2381].

Esse ganho define a lei de controle u(k) = Gξ(k), que combina realimentação dos estados da planta, ação integral e termo de feedforward associado à referência filtrada.

Poliedro invariante e trajetórias

O poliedro invariante obtido é definido no espaço aumentado $\mathbb{R}^4$. Sua projeção sobre o plano $x_1 \times x_2$ revela uma região poliédrica de geometria irregular, cujas faces são determinadas pelas restrições de estado e de controle. A projeção mostra que o poliedro está contido na caixa definida por |x_i| ≤ 15, confirmando a satisfação das restrições de estado.

Quatro trajetórias de estado foram simuladas a partir de condições iniciais pertencentes ao conjunto admissível, posicionadas nos vértices do poliedro projetado. O sinal de referência aplicado foi: r(k) = 8 para 0 ≤ k ≤ 300 e r(k) = −8 para 301 ≤ k ≤ 500. Todas as trajetórias convergiram inicialmente para o ponto de equilíbrio associado a r = 8 e, após a mudança de referência, transitaram para o equilíbrio correspondente a r = −8, sem violar as restrições de estado em nenhum instante.

Respostas temporais

A análise das respostas temporais dos estados $x_1(k)$ e $x_2(k)$, juntamente com a referência filtrada ω(k), mostra que o sistema atinge o regime permanente com erro nulo, confirmando o papel da ação integral. A transição entre os dois níveis de referência ocorre de forma suave, sem sobressinais que violem os limites |x_i| ≤ 15. O filtro de referência com δ = 0,99 introduz uma suavização significativa nas mudanças de set-point, evitando que transições abruptas exijam ações de controle excessivas.

Sinal de controle

O sinal de controle u(k) permanece dentro dos limites $|u| \leq 4$ durante toda a simulação, incluindo os instantes de transição entre referências. Isso confirma que as restrições de controle são respeitadas graças à contenção do poliedro invariante na região admissível de entrada, verificada pelas condições do Lema de Farkas Estendido.

Discussão sobre o conservadorismo

Um aspecto relevante observado é que o projeto resultou em ganhos de controle relativamente baixos e uma resposta temporal lenta. Isso é atribuído à função de custo do problema de otimização, que prioriza a maximização do tamanho do poliedro invariante. Como a planta em malha aberta já é estável, não há necessidade de ganhos elevados para evitar violação de restrições, e o otimizador converge para uma solução conservadora em termos de velocidade de resposta. Uma alternativa seria incorporar a taxa de contração λ em uma função de custo ponderada, promovendo uma resposta mais rápida em detrimento de um conjunto de condições iniciais admissíveis menor.

Outro ponto importante é a natureza não convexa do problema de otimização. Não há garantia de obtenção do ótimo global, e a solução encontrada depende da inicialização e dos parâmetros escolhidos pelo projetista. Ainda assim, a abordagem fornece uma solução viável e confiável para o problema de controle.

Progressão da pesquisa

É importante situar esses resultados no contexto da progressão da pesquisa. Inicialmente, o estudo concentrou-se na compreensão das condições de invariância poliédrica para o problema regulatório simples, sem atraso e sem restrições explícitas. Em seguida, restrições de estado e controle foram incorporadas, e a síntese simultânea por programação bilinear foi explorada. A introdução do atraso exigiu a compreensão da transformação de modelo e das condições dependentes de d. Finalmente, a extensão ao seguimento de referência demandou a formulação do modelo aumentado com ação integral e referência filtrada. Cada etapa constituiu um aprofundamento sobre a anterior, culminando na formulação unificada validada numericamente.

A transformação de modelo revelou-se o elemento central para viabilizar condições menos conservadoras. Ao desacoplar os modos dependentes do atraso, ela permite que a análise de invariância leve em conta o valor específico de d, em vez de tratar o atraso como uma incerteza de magnitude arbitrária. Isso se traduz em poliedros invariantes maiores e, consequentemente, em conjuntos de condições iniciais admissíveis mais amplos.

A formulação do seguimento de referência como problema de regulação no espaço aumentado mostrou-se eficaz. A ação integral garante erro nulo em regime permanente para referências constantes, enquanto o filtro de referência suaviza as transições e facilita a satisfação das restrições. A estrutura PI com feedforward resultante é de fácil interpretação e implementação prática.

Conclusão

A pesquisa desenvolvida ao longo deste ciclo de iniciação científica permitiu construir, de forma progressiva, uma metodologia de projeto de controladores para sistemas lineares discretos com atraso na entrada, sujeitos a restrições de estado e controle, com objetivo de seguimento de referência. Os principais resultados e contribuições são:
Compreensão e aplicação da teoria de conjuntos invariantes poliédricos ao problema regulatório e ao problema de seguimento de referência, por meio de formulação em espaço de estados aumentado com ação integral e referência filtrada.
Utilização de uma transformação de modelo que desacopla modos dependentes e independentes do atraso, possibilitando condições de invariância que incorporam explicitamente a magnitude do retardo e reduzem o conservadorismo das abordagens independentes de atraso.
Formulação de um problema de otimização bilinear para síntese simultânea do ganho de controle e do poliedro invariante, garantindo satisfação de restrições ao longo de toda a trajetória de rastreamento.
Validação numérica em uma planta de tanques acoplados, demonstrando rastreamento assintótico sem violação de restrições para diferentes níveis de referência.
Como limitações, destacam-se o conservadorismo associado à função de custo adotada, a natureza não convexa da otimização e a necessidade de especificação de diversos parâmetros pelo projetista. Como trabalhos futuros, destaca-se a modelagem explícita da saturação dos atuadores. Além disso, busca-se estender a metodologia para sistemas de maior ordem e grande dimensão, superando o aumento da complexidade computacional da otimização bilinear em espaços de estados maiores.

Referências

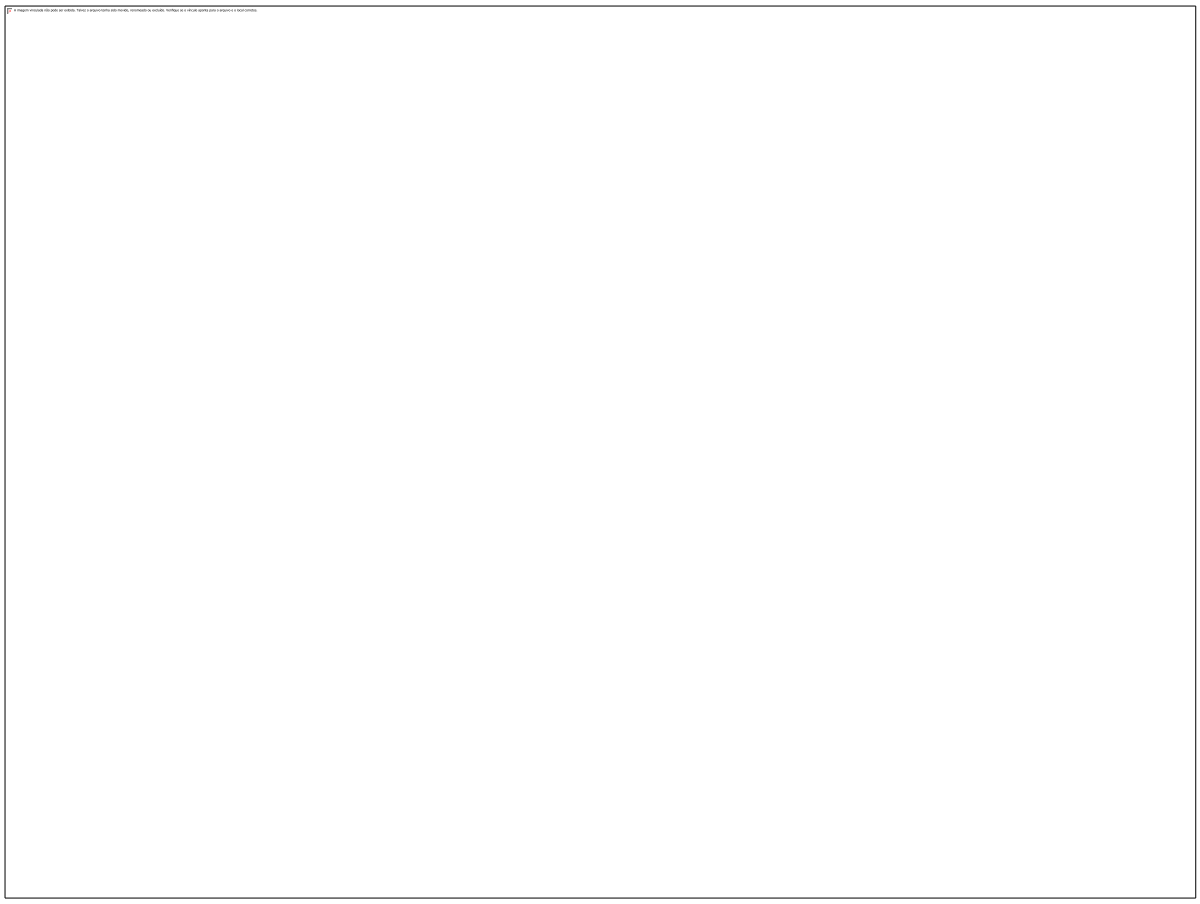
BLANCHINI, F.; MIANI, S. Set-Theoretic Methods in Control. 2. ed. Basel: Birkhäuser, 2015.
BRIÃO, S. L.; CASTELAN, E. B.; CAMPONOGARA, E.; ERNESTO, J. G. Output feedback design for discrete-time constrained systems subject to persistent disturbances via bilinear programming. Journal of the Franklin Institute, v. 358, n. 18, p. 9741–9770, 2021.
BYRD, R. H.; NOCEDAL, J.; WALTZ, R. A. KNITRO: An integrated package for nonlinear optimization. In: DI PILLO, G.; ROMA, M. (Ed.). Large-Scale Nonlinear Optimization. Boston: Springer, 2006. p. 35–59.
DÓREA, C. E. T.; OLARU, S.; NICULESCU, S. I. Delay-dependent invariance of polyhedral sets for discrete-time linear systems. IFAC-PapersOnLine, v. 56, n. 2, p. 3259–3264, 2023.
DÓREA, C. E. T.; OLARU, S.; NICULESCU, S. I.; RĂSVAN, V. Delay-dependent set-invariance for linear difference equations with multiple delays: a polyhedral approach. Journal of Difference Equations and Applications, v. 30, n. 10, p. 1644–1661, 2024.
HENNET, J. C.; TARBOURIECH, S. Stability conditions of constrained delay systems via positive invariance. International Journal of Robust and Nonlinear Control, v. 8, n. 3, p. 265–278, 1998.
LARABA, M. T.; OLARU, S.; NICULESCU, S. I.; BLANCHINI, F.; GIORDANO, G.;

CASAGRANDE, D.; MIANI, S. Guide on set invariance for delay difference equations. Annual Reviews in Control, v. 41, p. 13–23, 2016.
LOMBARDI, W.; OLARU, S.; LAZAR, M.; NICULESCU, S. I. On positive invariance for delay difference equations. In: Proceedings of the 2011 American Control Conference. San Francisco: IEEE, 2011. p. 3674–3679.
MARTINS, J.; MENEGHETTI, F.; DÓREA, C. An optimization-based method for tuning PI controllers for systems subject to control and output constraints. Przegląd Elektrotechniczny, v. 98, p. 145–153, 2022.
MILANI, B. E.; DÓREA, C. E. On invariant polyhedra of continuous-time systems subject to additive disturbances. Automatica, v. 32, n. 5, p. 785–789, 1996.
NICULESCU, S. I. Delay Effects on Stability: A Robust Control Approach. London: Springer, 2001.
NORMEY-RICO, J. E.; CAMACHO, E. F. Control of Dead-time Processes. London: Springer, 2007.
QUANSER INC. Coupled Tanks – Data Sheet. Markham: Quanser Inc., 2015. V1.3.
SANTOS, G. F.; CASTELAN, E. B.; LUCIA, W. On the design of constrained PI-like output feedback tracking controllers via robust positive invariance and bilinear programming. IEEE Control Systems Letters, v. 7, p. 1429–1434, 2023.
SILVA, F. R.; LOPES, N. W.; DÓREA, C. E. T. Constrained reference tracking for linear systems with delayed input. In: Anais do Congresso Brasileiro de Automática, 2025.

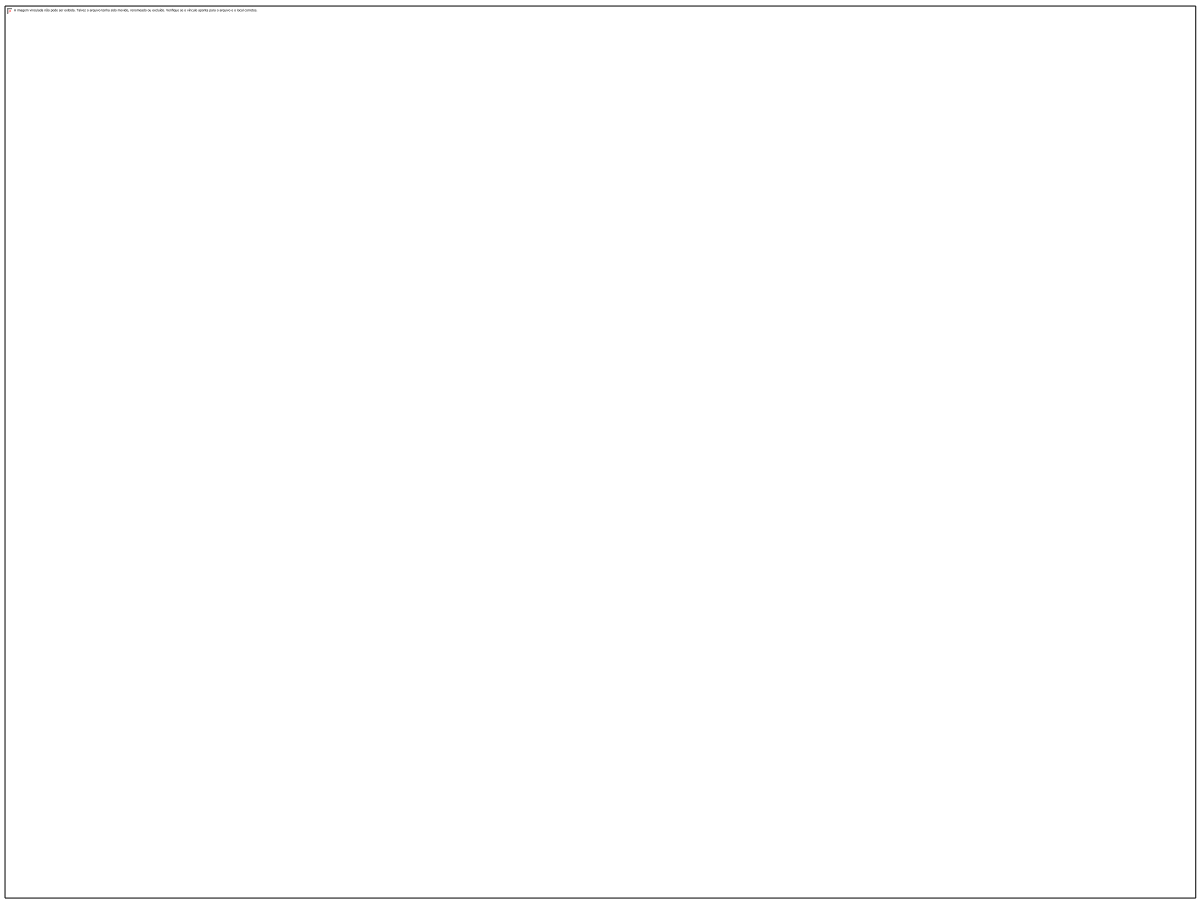
Anexos



Evolução dos estados



Evoluação da ação de controle



Trajetórias de estado

CÓDIGO: ET0401

AUTOR: VINÍCIUS DE SOUZA FREITAS

ORIENTADOR: CARLSON PEREIRA DE SOUZA

TÍTULO: ESTUDO DE MÉTODOS DE EXTRAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA A EXTRAÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL DA CANNABIS SATIVA GENÉTICA CHEMDAWG

Resumo

A padronização da extração sólido-líquido em aparelho Soxhlet é fundamental para garantir a reprodutibilidade fitoquímica e a viabilidade técnica de insumos terapêuticos. Este trabalho avaliou a cinética e o equilíbrio difusivo da extração etanólica de folhas secas de crajiru (Arrabidaea chica), utilizada como matriz vegetal modelo para estabelecer parâmetros de transferência de massa e modelagem matemática aplicáveis à futura extração de fitocanabinoides de Cannabis sativa. O estudo empregou um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2^2 + axiais + ponto central, totalizando 10 ensaios, avaliando a razão sólido/líquido (2,0 a 8,0 g/150 mL) e o tempo de refluxo (1,0 a 1,4 h). Os rendimentos mássicos variaram de 2,21% a 42,37%, com recuperação de etanol de até 92,00%. A menor carga de biomassa (2,0 g) favoreceu a percolação convectiva e reduziu limitações difusivas, sendo 2,0 g e 1,2 h a melhor condição operacional, com 28,79% de rendimento e 89,33% de recuperação etanólica. A ANOVA e o Diagrama de Pareto indicaram a interação entre massa e tempo como o termo de maior magnitude sobre o rendimento (Fcalc = 6,8603; p = 0,0588). O modelo ajustado validou os ciclos térmicos próximos ao ponto de ebulição do etanol (78 °C), sem evidências de degradação dos compostos polifenólicos, fornecendo parâmetros para futuras extrações de CBD e Δ9-THC e contribuindo para o desenvolvimento de fitoterápicos destinados ao alívio de dor neuropática e inflamações associadas à hanseníase.

Palavras-chave: Arrabidaea chica; Cannabis sativa; Extração por Soxhlet; DCCR

TITLE: Study of Extraction Methods and Parameter Optimization for the Extraction of Essential Oil from *Cannabis sativa* (Chemdawg Genetics)

Abstract

The standardization of solid-liquid extraction using a Soxhlet apparatus is essential to ensure phytochemical reproducibility and the technical feasibility of therapeutic products. This study evaluated the kinetics and diffusional equilibrium of the ethanolic extraction of dried crajiru (Arrabidaea chica) leaves, used as a model plant matrix to

establish mass transfer parameters applicable to the future extraction of phytocannabinoids from Cannabis sativa. A Central Composite Rotatable Design (CCRD) was employed, comprising 10 experiments that evaluated the solid-to-liquid ratio (2.0–8.0 g/150 mL) and reflux time (1.0–1.4 h). Mass yields ranged from 2.21% to 42.37%, while ethanol recovery reached 92.00%. Lower biomass loading (2.0 g) favored convective percolation and reduced diffusional limitations. The condition of 2.0 g and 1.2 h of reflux provided the best operational balance, achieving a 28.79% mass yield and 89.33% ethanol recovery. ANOVA and the Pareto chart indicated that the interaction between biomass mass and extraction time had the greatest effect on yield (Fcalc = 6.8603; p = 0.0588). The fitted model validated thermal cycles near ethanol's boiling point (78 °C), without evidence of polyphenolic compound degradation, providing parameters for future CBD and Δ9-THC extraction. These findings may contribute to the development of phytotherapeutic products aimed at alleviating neuropathic pain and inflammation associated with leprosy.

Keywords: Arrabidaea chica; Cannabis sativa; Soxhlet extraction; CCRD

Introdução

A busca por compostos bioativos naturais tem impulsionado a pesquisa fitofarmacêutica na busca por alternativas terapêuticas eficazes e com menor incidência de efeitos adversos. Entre as espécies de interesse destacam-se o crajiru (Arrabidaea chica, sinônimo aceito Fridericia chica) e a Cannabis sativa L., devido à riqueza de suas matrizes fitoquímicas e ao potencial farmacológico de seus metabólitos secundários.

Nativo das regiões tropicais da América do Sul e amplamente distribuído na Amazônia brasileira, o crajiru é tradicionalmente utilizado na medicina popular por meio de infusões e decocções de suas folhas. Seu uso está relacionado ao tratamento de afecções gastrointestinais e inflamatórias, além de aplicações tópicas como cicatrizante e adstringente. Essas propriedades estão associadas à presença de compostos fenólicos, principalmente flavonoides, taninos e 3-desoxiantocianidinas, com destaque para a carajurina, que apresentam atividades antioxidantes e anti-inflamatórias.

A Cannabis sativa apresenta um fitocomplexo constituído principalmente por fitocanabinoides, como canabidiol (CBD) e Δ9-tetrahidrocanabinol (Δ9-THC), além de CBG, CBN e diversos terpenos. Esses compostos têm sido investigados por sua ação sobre o sistema endocanabinoide e seu potencial no manejo da dor crônica, neuropatias, epilepsia e processos inflamatórios.

Nos tecidos vegetais, os canabinoides são encontrados predominantemente como precursores ácidos, como CBDA e Δ9-THCA. A conversão para CBD e Δ9-THC ocorre por descarboxilação, favorecida pelo aquecimento controlado. O controle de temperatura e tempo é essencial, pois condições excessivas podem causar degradação dos compostos e perdas de substâncias voláteis.

A recuperação dos bioativos depende do método de extração e das propriedades do solvente. Entre as técnicas disponíveis estão maceração, ultrassom, micro-ondas, extração enzimática, fluidos supercríticos e extração sólido-líquido. Apesar da elevada

seletividade do CO_2 supercrítico, seu alto custo e complexidade limitam sua aplicação. Nesse contexto, o aparelho Soxhlet constitui uma alternativa clássica e eficiente, baseada em ciclos contínuos de condensação e refluxo do solvente, favorecendo a transferência de massa e o esgotamento da matriz vegetal.

A polaridade do solvente influencia diretamente a seletividade do processo. Solventes polares e misturas hidroalcoólicas favorecem a extração de compostos fenólicos do crajiru, enquanto sistemas alcoólicos podem favorecer a recuperação de fitocanabinoides e terpenos. O controle térmico é igualmente importante para garantir eficiência e preservar compostos termolábeis.

Devido às restrições regulatórias e à disponibilidade controlada de Cannabis sativa nas etapas iniciais do projeto, o crajiru foi utilizado como biomassa vegetal modelo. Sua disponibilidade, segurança no manuseio e riqueza em metabólitos secundários permitem a padronização de parâmetros como granulometria, tempo de extração e volume de solvente antes da aplicação à Cannabis.

Assim, este trabalho tem como objetivo investigar e modelar os parâmetros operacionais da extração em Soxhlet aplicada às folhas de crajiru e às inflorescências de Cannabis sativa, avaliando a influência dos solventes e dos ciclos térmicos sobre o rendimento e a integridade dos metabólitos, visando estabelecer uma metodologia reprodutível para a obtenção de extratos de interesse fitoterápico e farmacêutico.

Metodologia

O emprego de ferramentas de planejamento experimental constitui uma abordagem estatística e matemática indispensável na otimização de bioprocessos e extrações de matrizes vegetais complexas. Essa metodologia permite a investigação simultânea de múltiplos parâmetros operacionais — tais como massa de biomassa sólida, tempo de ciclo e razão sólido-solvente —, minimizando o número total de ensaios requeridos sem comprometer a robustez analítica, além de identificar com precisão os efeitos principais, quadráticos e os fenômenos de interação sinérgica ou antagônica entre as variáveis independentes que regem as respostas de rendimento e pureza dos metabólitos secundários. No presente estudo voltado à extração sólido-líquido em aparelho Soxhlet para as folhas de crajiru (Arrabidaea chica) e posterior transposição para as inflorescências de Cannabis sativa, adotou-se o delineamento fatorial do tipo 23 + 2, estruturado em oito pontos fatoriais nos níveis (-1) e (+1) associados a duas repetições no ponto central (0). Esse arranjo experimental viabilizou o cálculo do erro puro residual, a verificação da curvatura do sistema e a validação do modelo matemático via Análise de Variância (ANOVA), estabelecendo condições térmicas e difusivas precisas para a máxima recuperação das frações bioativas de interesse medicinal.
O protocolo experimental iniciou-se com a coleta do material botânico das folhas de crajiru (Arrabidaea chica (Humb. & Bonpl.) B. Verl.), realizada nas imediações do Laboratório de Materiais Nanoestruturados e Reatores Catalíticos (LAMNRC), infraestrutura que também disponibilizou os equipamentos analíticos e reagentes empregados nesta pesquisa.

A biomassa vegetal fresca foi submetida à dessecação por convecção em estufa de ar circulante a 35ºC durante um intervalo de 48 horas, visando a redução substancial do teor de umidade residual a níveis mínimos sem comprometer a estabilidade térmica dos metabólitos secundários de interesse terapêutico. Após a secagem, as folhas foram desintegradas com o auxílio de um moinho de lâminas rotativas para diminuição da granulometria, ampliando a área superficial de contato sólido-líquido e otimizando os fenômenos de transferência de massa durante o processo extrativo.

2.2. Procedimento de Extração por Soxhlet e Concentração

Para os ensaios de extração contínua sólido-líquido, empregou-se o extrator Soxhlet acoplado a um banho termostatizado de condensação e sistema de vácuo. Em cada ciclo experimental, utilizou-se um volume fixo de 150 mL de etanol 96 P.A. como fase líquida de arraste e dissolução. Concluído o tempo de refluxo pré-estabelecido pelo planejamento, a mistura miscella (solvente–extrato) foi transferida para um evaporador rotativo com banho-maria sob rotação constante, promovendo a recuperação do etanol e a concentração da fração fitoquímica até a estabilização visível da densidade e viscosidade do concentrado lipofílico/resinoso.

O extrato bruto concentrado foi quantificado gravimetricamente em balança analítica de precisão para a determinação do rendimento mássico global. Em seguida, as frações foram acondicionadas em frascos âmbar herméticos e revestidos com folha de alumínio, minimizando a incidência de radiação luminosa para prevenir reações indesejadas de fotodegradação ou fotooxidação dos compostos ativos. O volume de etanol recuperado no condensador foi registrado para avaliar a eficiência do balanço de solvente no circuito.

2.3. Planejamento Experimental e Tratamento Estatístico

Com a finalidade de modelar e avaliar as condições ótimas de extração dos metabólitos secundários do crajiru (Arrabidaea chica) como plataforma inicial de correlação para a posterior extração de canabinoides (canabidiol - CBD e Δ9-tetrahidrocanabinol - Δ9-THC) de Cannabis sativa, adotou-se um Delineamento Composto Central (DCC). Os fatores independentes investigados foram a massa de biomassa vegetal seca (Massa) e o tempo de refluxo contínuo no extrator Soxhlet (t Soxhlet). As variáveis de resposta analisadas foram o rendimento percentual de extrato obtido (Rend%) e o percentual de solvente etanólico recuperado (Álcool Rec%), totalizando 10 ensaios experimentais conforme as condições matriciais codificadas.

A validação do modelo matemático e a significância dos efeitos lineares, quadráticos e de interação entre os fatores foram avaliadas por meio da Análise de Variância (ANOVA), adotando-se o nível de significância de 95 ($p < 0,05$). Diagramas de Pareto foram construídos para identificar os parâmetros estatisticamente determinantes sobre o processo extrativo. Adicionalmente, foram gerados gráficos de correlação entre os valores experimentais observados e os preditos pelo modelo ajustado. O tratamento e a análise estatística dos dados foram executados com o auxílio do software Statistica 7.0.

Resultados e Discussões

A avaliação experimental da extração sólido-líquido em extrator Soxhlet aplicada às folhas de crajiru (Arrabidaea chica) foi conduzida a partir de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) do tipo 22 + axiais + ponto central, estruturado para modelar a influência da razão sólido/líquido(S/L, de 2,0 a 8,0g/150mL, fator A) e do tempo de ciclo de refluxo contínuo (t, de 1,0 a 1,4h, fator B) sobre o rendimento mássico percentual e a taxa de recuperação do solvente etanólico (Nde & Foncha, 2020; Lazarjani et al., 2021). A matriz de planejamento totalizou dez ensaios executados em ordem aleatorizada (Ensaios 8, 9, 10, 5, 7, 2, 6, 3, 4 e 1) para mitigar a propagação de erros sistemáticos ao longo das bateladas (Grijó et al., 2018; Grijó et al., 2019). Essa configuração experimental reuniu quatro pontos fatoriais nos níveis codificados (± 1), correspondendo aos Ensaios 1 (2,9g; 1,1h), 2 (7,1g; 1,1h), 3 (2,9g;1,3h) e 4 (7,1g;1,3h); quatro pontos axiais ou estelares nos níveis (±α), com $\alpha = \sqrt{2} \approx 1{,}41$ para assegurar a propriedade de rotacionalidade do modelo, contemplando os Ensaios 5 (2,0g; 1,2h), 6 (8,0g; 1,2h), 7 (5,0g; 1,0h) e 8 (5,0 g; 1,4h); e duas repetições no ponto central (0,0), representadas pelos Ensaios 9 e 10 (5,0 g; 1,2h) (Grijó et al., 2018; Nde & Foncha, 2020). A inclusão dos pontos axiais viabilizou a estimativa dos coeficientes quadráticos e de curvatura para o ajuste do modelo polinomial de segunda ordem com termos de interação $Y = \beta 0 + \beta 1\ X1 + \beta 2\ X2 + \beta 11\ X12 + \beta 22\ X22 + \beta 12\ X1\ X2 + \varepsilon$, enquanto a duplicata central forneceu uma estimativa independente da variância do erro puro experimental frente à falta de ajuste (Nde & Foncha, 2020).

A análise gravimétrica dos extratos concentrados evidenciou ampla dispersão nos rendimentos globais obtidos, oscilando entre 2,21% (Ensaio 2) e 42,37% (Ensaio 1), demonstrando que a razão sólido/líquido exerce efeito pronunciado sobre os fenômenos de transporte na câmara de refluxo (Sovová, 1994; Nde & Foncha, 2020). Os experimentos operados sob menores cargas de biomassa vegetal (2,0 a 2,9g) apresentaram rendimentos médios substancialmente superiores, conforme observado nos Ensaios 1 (42,37%), 5 (28,79%) e 3 (17,49%), uma vez que leitos menos volumosos favorecem a circulação convectiva do solvente renovado em contato íntimo com a matriz particulada (Sovová, 1994). Em contrapartida, a elevação da massa vegetal para patamares superiores a 7g, verificada nos Ensaios 2 (7,1133g; 1,1h), 4 (7,1051g; 1,3h) e 6 (8,1026g; 1,1h), induziu a compactação mecânica do leito no interior do cartucho poroso, impondo resistência física à percolação do etanol e restringindo o coeficiente de transferência de massa interfacial (kF) característico do período de taxa de extração constante (CER) (Sovová, 1994; Grijó et al., 2018), o que justifica a acentuada redução de rendimento observada especificamente no Ensaio 2 (2,21%). No que tange à reprodutibilidade das réplicas centrais, constatou-se uma discrepância relevante entre o Ensaio 9 (11,93%) e o Ensaio 10 (20,70%). Esse valor superestimado no Ensaio 10 não refletiu um aumento genuíno na recuperação dos metabólitos secundários, mas sim uma etapa incompleta de desolventização e evaporação no evaporador rotativo, na qual frações de umidade residual e solvente permaneceram retidas no concentrado viscoso final (Nde & Foncha, 2020). Quanto à recuperação do solvente etanólico, o sistema condensador acoplado à rota-evaporação operou com elevada eficiência operacional, exibindo taxas de recuperação situadas predominantemente na faixa de 70,67% a 92,00%, com destaque para os Ensaios 3 (92,00%) e 5 (89,33%). A ponderação conjunta dessas variáveis consolidou o Ensaio 5 (1,9995g de amostra; 1,2h no Soxhlet)

como a condição operacional mais equilibrada e vantajosa do estudo, alcançando 28,79% de rendimento real de extrato e 89,33% de recuperação de álcool, viabilizando o esgotamento fitoquímico com tempo de exposição térmica moderado (Balaji et al., 2014; Nde & Foncha, 2020).

A análise de significância estatística do modelo ajustado para a variável resposta de rendimento mássico percentual foi conduzida por meio da Análise de Variância (ANOVA) e sintetizada no Diagrama de Pareto de efeitos padronizados. A soma quadrática total do sistema alcançou 1165,938 (com 9 graus de liberdade), da qual a soma quadrática residual associada ao erro experimental perfez 260,433 (MS = 65,1083 com 4 graus de liberdade). O termo de maior magnitude e impacto sobre o rendimento foi a interação linear entre a razão sólido/líquido e o tempo de extração (1L by 2L), com soma quadrática de 446,660, Fcalculado = 6,8602 e p = 0,0588, demonstrando um efeito positivo padronizado de +2,6192 no Diagrama de Pareto. Embora este termo tenha ficado marginalmente limítrofe à linha de significância estatística rigorosa de 95% (p = 0,05), ele evidencia uma forte tendência sinérgica entre a carga de biomassa e a duração do refluxo, confirmando que a extensão temporal do ciclo potencializa o rendimento primordialmente quando associada a razões de alimentação favoráveis à transferência de massa interfacial (Nde & Foncha, 2020). O segundo termo mais proeminente consistiu no efeito quadrático da massa de amostra (A(Q)), com soma quadrática de 237,001, Fcalculado = 3,6401, p = 0,1291 e efeito padronizado de +1,9079, corroborando a presença de curvatura no sistema provocada pela transição entre o esgotamento por convecção e o bloqueio difusivo decorrente da sobrecarga de leito (Sovová, 1994). Os efeitos lineares individuais da massa (A(L), efeito padronizado -1,0384, p = 0,3577) e do tempo (B(L), efeito padronizado +0,6541, p = 0,5487), bem como o efeito quadrático do tempo (B(Q), efeito padronizado -0,1888, p = 0,8594), apresentaram valores de F inferiores aos críticos, indicando que a dinâmica extrativa em Soxhlet não responde de maneira puramente isolada a cada variável, mas sim ao acoplamento termodinâmico e hidrodinâmico expresso pela interação entre ambos os fatores (Balaji et al., 2014; Nde & Foncha, 2020).

De forma complementar, a avaliação estatística da taxa de recuperação de álcool (Álcool rec.%) revelou um comportamento independente das variáveis operacionais do leito de extração, com quadrado médio residual de 67,3835 (MSresidual). Conforme ilustrado no respectivo Diagrama de Pareto de efeitos padronizados, nenhum dos fatores principais ou de interação atingiu o limiar de significância estatística ao nível de 95% de confiança (p = 0,05). O efeito linear da massa (A(L)) exibiu a maior contribuição relativa, com efeito padronizado de -0,9788, indicando uma leve tendência de menor recuperação de solvente em cargas elevadas de biomassa em virtude da maior retenção física de líquido nos poros do leito particulado. Os demais termos avaliados — incluindo o efeito quadrático do tempo (B(Q), efeito padronizado -0,5952), o efeito quadrático da massa (A(Q), efeito padronizado +0,3313), o efeito linear do tempo (B(L), efeito padronizado -0,2394) e a interação linear (1L by 2L, efeito padronizado -0,0207) — mantiveram-se amplamente afastados da linha crítica de significância. Esse resultado comprova que a eficiência da etapa de desolventização e condensação é governada predominantemente pela capacidade de troca térmica do evaporador rotativo e pelo controle de vácuo, demonstrando a estabilidade e a robustez do ciclo de reaproveitamento do etanol sem que variações moderadas de tempo e massa comprometam a sustentabilidade econômica do processo (Nde & Foncha, 2020).

A dinâmica extrativa observada nas folhas de crajiru fundamenta-se na solvatação de seu fitocomplexo polifenólico por meio do etanol 96% P.A., o qual atua solubilizando taninos, flavonoides e 3-desoxiantocianidinas (principalmente a carajurina), metabólitos responsáveis pela intensa pigmentação avermelhada e pelas atividades biológicas cicatrizantes e anti-inflamatórias descritas na etnofarmacologia clássica de suas infusões (Shahidi & Naczk, 1995; Balasundram et al., 2006). A validação dos ciclos térmicos e da transferência de massa nessa matriz modelo viabiliza a transposição metodológica direta para o processamento de inflorescências de Cannabis sativa, uma vez que a temperatura de ebulição do etanol (78ºC) no sistema Soxhlet assegura a extração exaustiva de fitocanabinoides (CBD e Δ9-THC) e terpenos bioativos (como β-cariofileno, α-humuleno) sem provocar a termodegradação acelerada ou oxidação indesejada dos princípios ativos termolábeis (Grijó et al., 2018; Valizadehderakhshan et al., 2021; Moreno-Chamba et al., 2024; Kabdy et al., 2025). Dessa forma, a parametrização estabelecida pelo DCCR em crajiru consolida uma rota analítica reprodutível, de baixo custo e alta eficiência difusiva, pré-requisito indispensável para a padronização e o desenvolvimento de insumos fitoterápicos de elevado grau de pureza farmacotécnica (Grijó et al., 2018; Suárez-Jacobo et al., 2023).

Conclusão

A parametrização operacional e a modelagem do sistema Soxhlet consolidaram as folhas de crajiru (Arrabidaea chica) como uma matriz vegetal modelo para a padronização cinética de transferência de massa, validação do balanço de solvente e mitigação do estresse térmico sobre metabólitos secundários. Esse protocolo experimental estabeleceu as bases de engenharia de processos requeridas para a transposição segura e eficiente voltada à recuperação exaustiva de fitocanabinoides (CBD e Δ9-THC) e terpenoides a partir de inflorescências de Cannabis sativa.

Para a consolidação desses insumos em escala piloto e industrial, torna-se imprescindível a condução de estudos futuros focados no aprofundamento analítico e na caracterização fitoquímica detalhada das frações obtidas. Recomenda-se o emprego sistemático de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência acoplada a Detector por Arranjo de Diodos e Espectrometria de Massas Sequencial (HPLC-DAD-MS/MS) para a quantificação inequívoca de canabinoides neutros e ácidos, Cromatografia Gasosa acoplada a Espectrometria de Massas (GC-MS) no modo headspace para elucidação do perfil de terpenos voláteis, Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FT-IR) para monitoramento de grupos funcionais e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) acoplada à Termogravimetria (TG) para determinação da estabilidade térmica e cinética de degradação.

No âmbito farmacêutico geral, os extratos de crajiru (Arrabidaea chica) apresentam elevado potencial para o desenvolvimento de formulações dermatológicas, fitoterápicos tópicos e cicatrizantes, alavancados por sua marcante ação antioxidante, adstringente, gastroprotetora e moduladora de processos inflamatórios decorrente das 3-desoxiantocianidinas (carajurina) e flavonoides.

Em paralelo, o óleo enriquecido com fitocanabinoides e terpenos de Cannabis sativa abre perspectivas clínicas estratégicas aplicadas à realidade da saúde pública regional, destacando-se o contexto do Hospital Estadual Giselda Trigueiro, centro de referência em infectologia e dermatologia sanitária no Rio Grande do Norte. O fitocomplexo canabinoide, associado a terpenos como o β-cariofileno e α-humuleno, desponta como alternativa terapêutica adjuvante no manejo das reações hansênicas, das neurites e da dor neuropática crônica refratária decorrente do dano neural periférico provocado pelo Mycobacterium leprae. A ação imunomoduladora, analgésica e neuroprotetora mediada pelos receptores CB1 e CB2 oferece subsídios para futuros ensaios pré-clínicos e clínicos no hospital, promovendo a reparação tecidual, a regeneração funcional dos nervos e o incremento na qualidade de vida dos pacientes acometidos pela hanseníase.

Referências

ALOO, S. O. et al. Characterization of different hempseed fractions after dehulling and defatting: chemical composition and functional properties. Journal of Food Measurement and Characterization, v. 18, n. 10, p. 7868–7883, 2024.

ANDREO, D.; JORGE, N. Antioxidantes naturais: técnicas de extração. Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, Curitiba, v. 24, n. 2, p. 319–336, 2006.

BALAJI, P.; SANJAY, D.; MUNISH, S. Optimization of oil extraction and characterization from Tamarindus indica linn seed oil. International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering, v. 2, n. 1, p. 1–6, 2014.

BALASUNDRAM, N.; SUNDRAM, K.; SAMMAN, S. Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. Food Chemistry, London, v. 99, n. 1, p. 191–203, 2006.

BUTLER, M. S.; BUSS, A. D. Natural products: the future scaffolds for novel drugs? Biochemical Pharmacology, v. 71, n. 7, p. 919–929, 2006.

GRIJÓ, D. R. Extração de bioativos derivados de Cannabis via fluidos pressurizados. 2018. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

GRIJÓ, D. R.; VIEITEZ OSORIO, I. A.; CARDOZO-FILHO, L. Supercritical extraction strategies using CO_2 and ethanol to obtain cannabinoid compounds from Cannabis hybrid flowers. Journal of CO_2 Utilization, v. 28, p. 174–180, 2018.

KABDY, H. et al. Moroccan Cannabis sativa essential oil attenuates peripheral neuropathic pain induced by chronic sciatic nerve constriction injury in mice. Journal of Ethnopharmacology, v. 343, art. 119486, p. 1–8, 2025.

KELLER, N. P.; TURNER, G.; BENNETT, J. W. Fungal secondary metabolism: from biochemistry to genomics. Nature Reviews Microbiology, v. 3, n. 12, p. 937–947, 2005.

LAZARJANI, M. P. et al. Methods for extraction and processing of medicinal Cannabis sativa L. compounds: A review. Journal of Cannabis Research, v. 3, n. 1, art. 32, 2021.

LI, H. et al. Effect of different extraction methods on the structural analysis, water solubility, and bioactivity of hemp polysaccharides-cannabidiol complexes. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 716, art. 136729, p. 1–8, 2025.

MORENO-CHAMBA, B. et al. Aromatic and cannabinoid profiles of Cannabis inflorescences and seed oils: A comprehensive approach for variety characterization. Industrial Crops and Products, v. 210, art. 118143, p. 1–13, 2024.

NDE, D. B.; FONCHA, A. C. Optimization Methods for the Extraction of Vegetable Oils: A Review. Processes, Basel, v. 8, n. 2, art. 209, p. 1–21, 2020.

PELÁEZ, F. The historical delivery of antibiotics from microbial natural products: new approaches to find new drugs. Biochemical Pharmacology, v. 71, n. 7, p. 981–990, 2006.

SHAHIDI, F.; NACZK, M. Food phenolics: sources, chemistry, effects, and applications. Lancaster: Technomic Publishing, 1995. p. 281–319.

SOVOVÁ, H. Rate of the vegetable oil extraction with supercritical CO_2 — I. Modelling of extraction curves. Chemical Engineering Science, v. 49, n. 3, p. 409–414, 1994.

SUÁREZ-JACOBO, Á. et al. Cannabis Extraction Technologies: Impact of Research and Value Addition in Latin America. Molecules, v. 28, n. 7, art. 2895, p. 1–25, 2023.

TAVARES, C. A. Metabólitos secundários de plantas. Viçosa: Editora UFV, 1999.

VALIZADEHDERAKHSHAN, M. et al. Extraction of Cannabinoids from Cannabis sativa L. (Hemp)—Review. Agriculture, v. 11, n. 5, art. 384, p. 1–21, 2021.

Anexos



Tabela 1

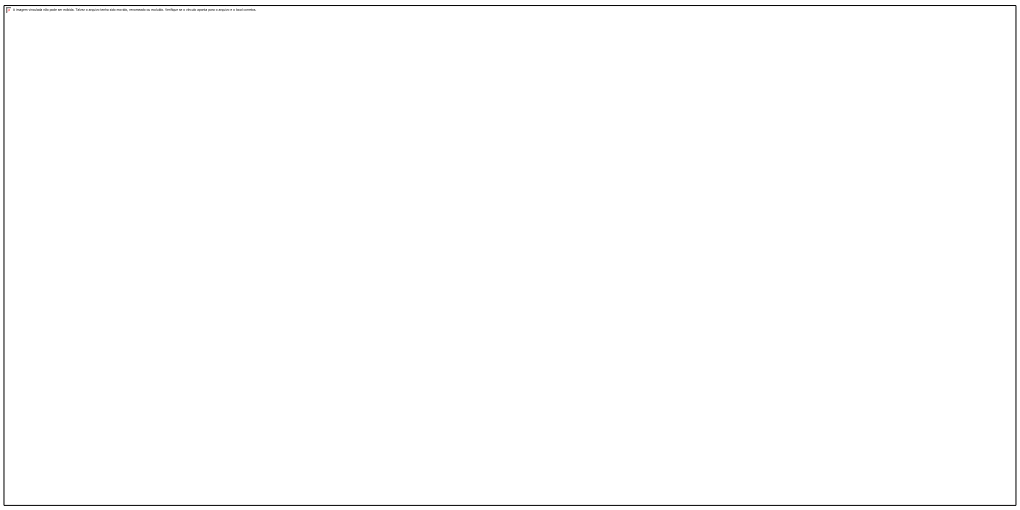


Tabela 2



Tabela 3

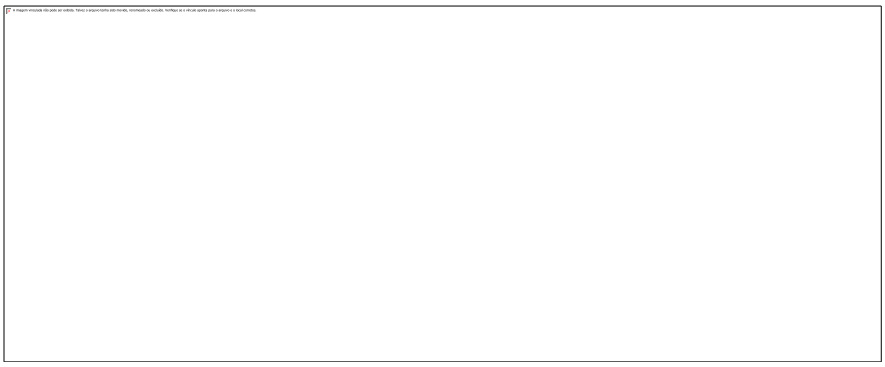


Tabela 4

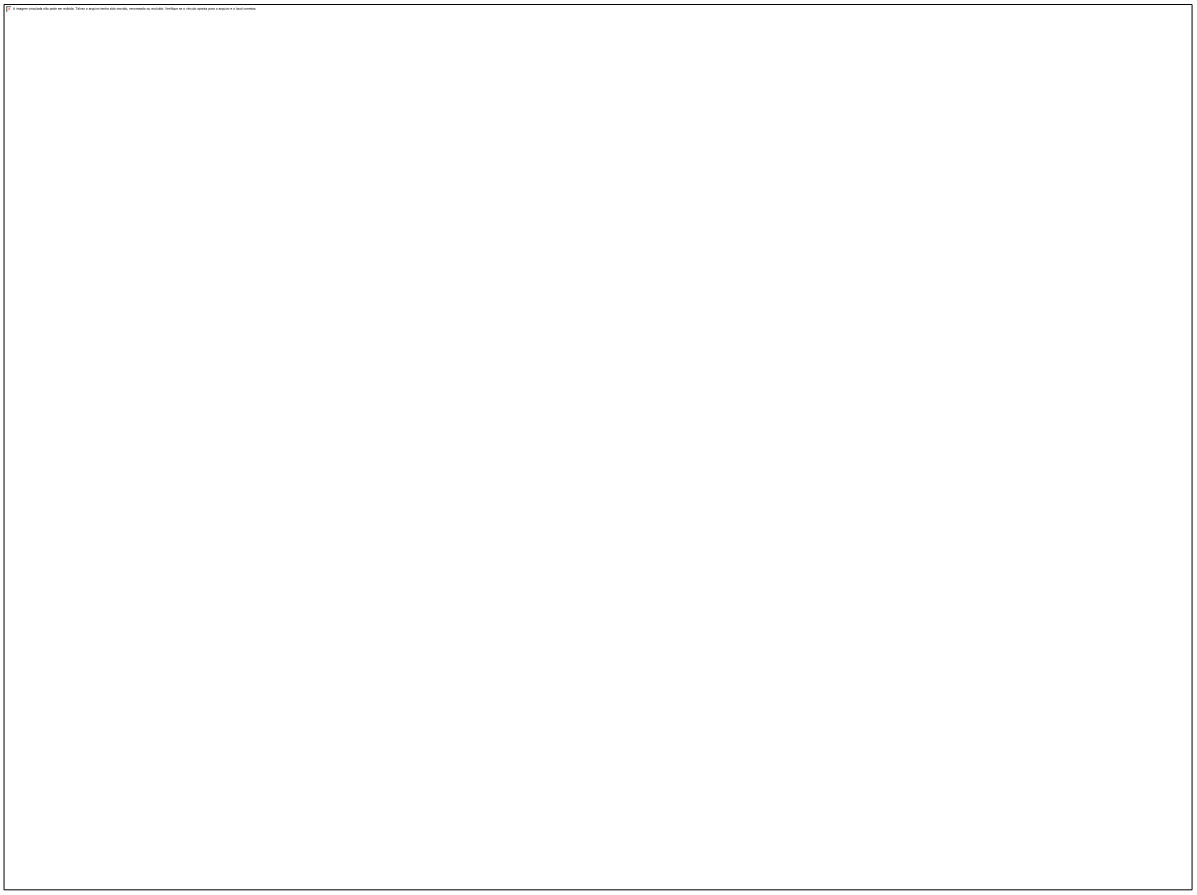


Diagrama 1

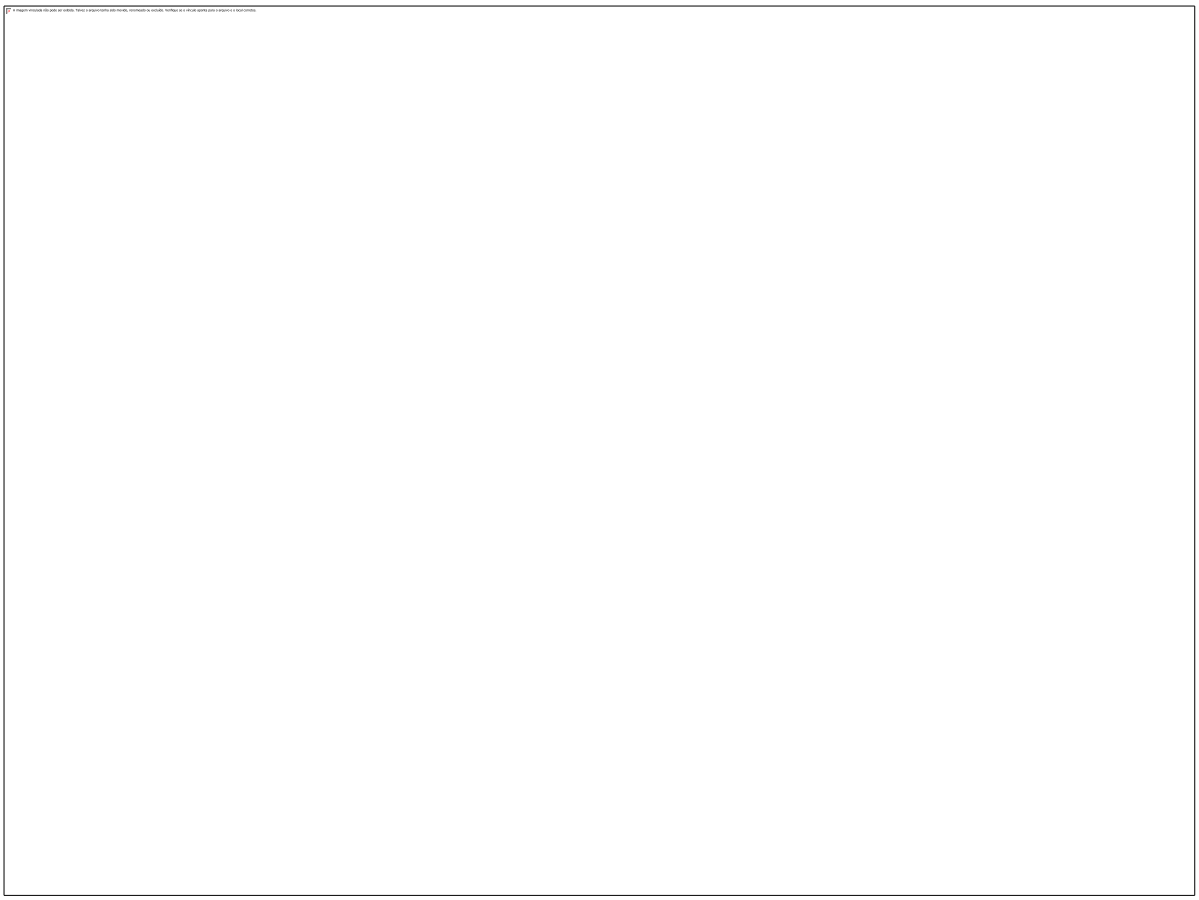


Diagrama 2

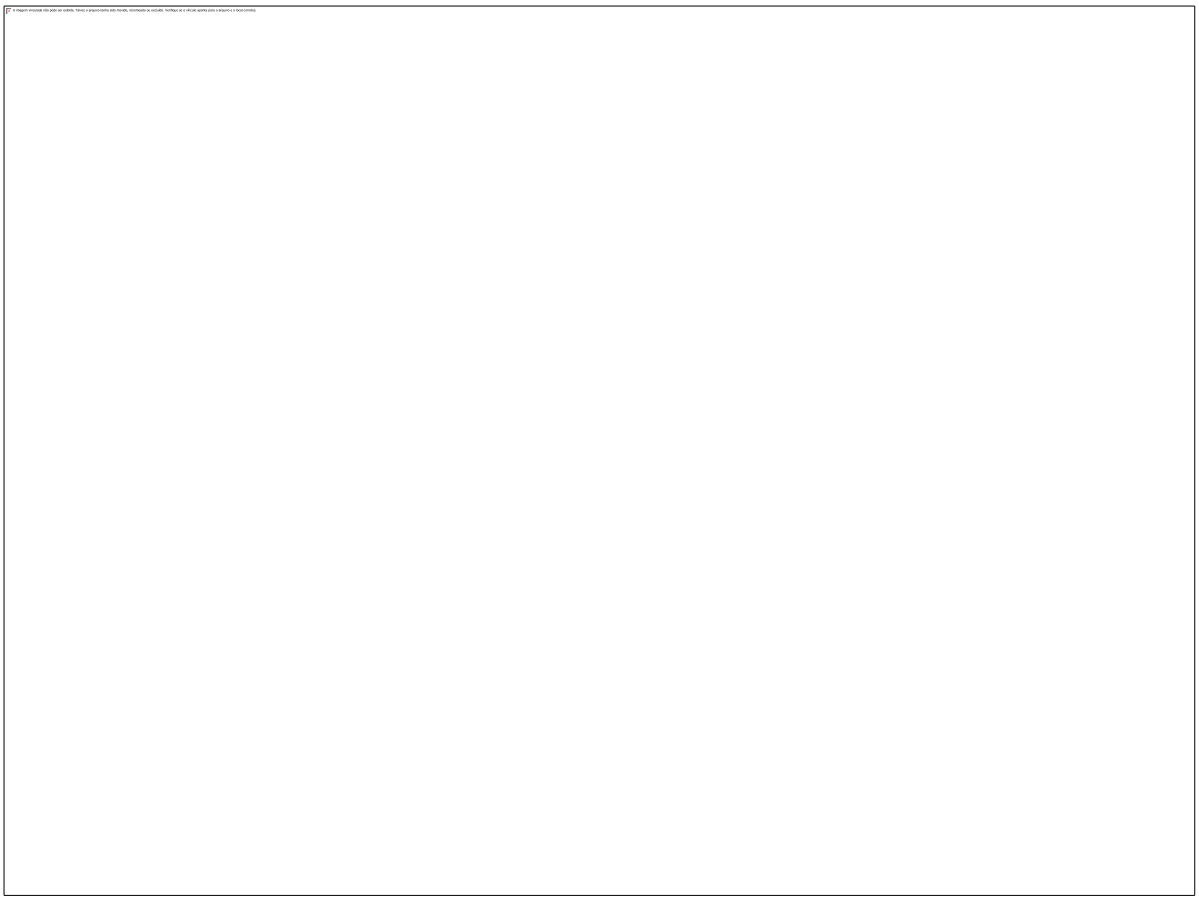


Diagrama 2

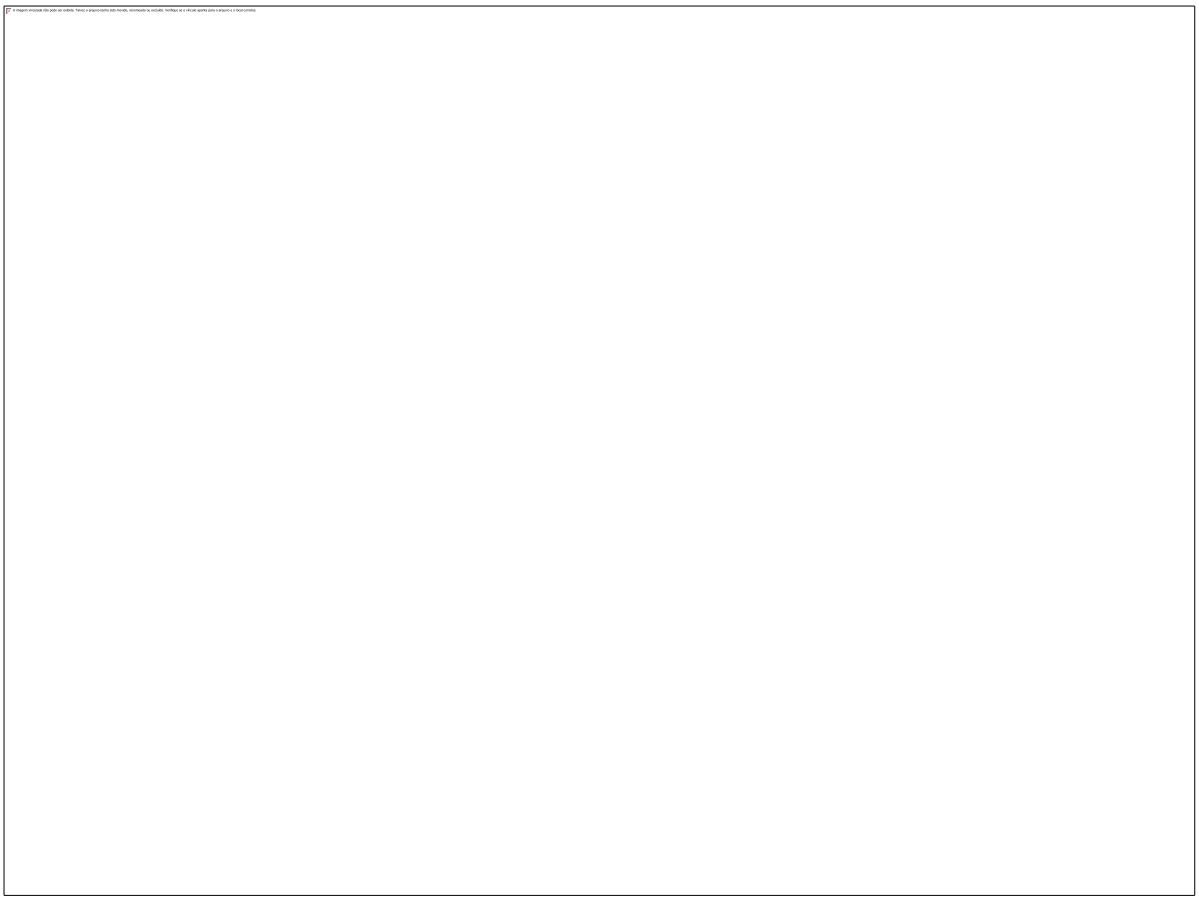


Diagrama 2

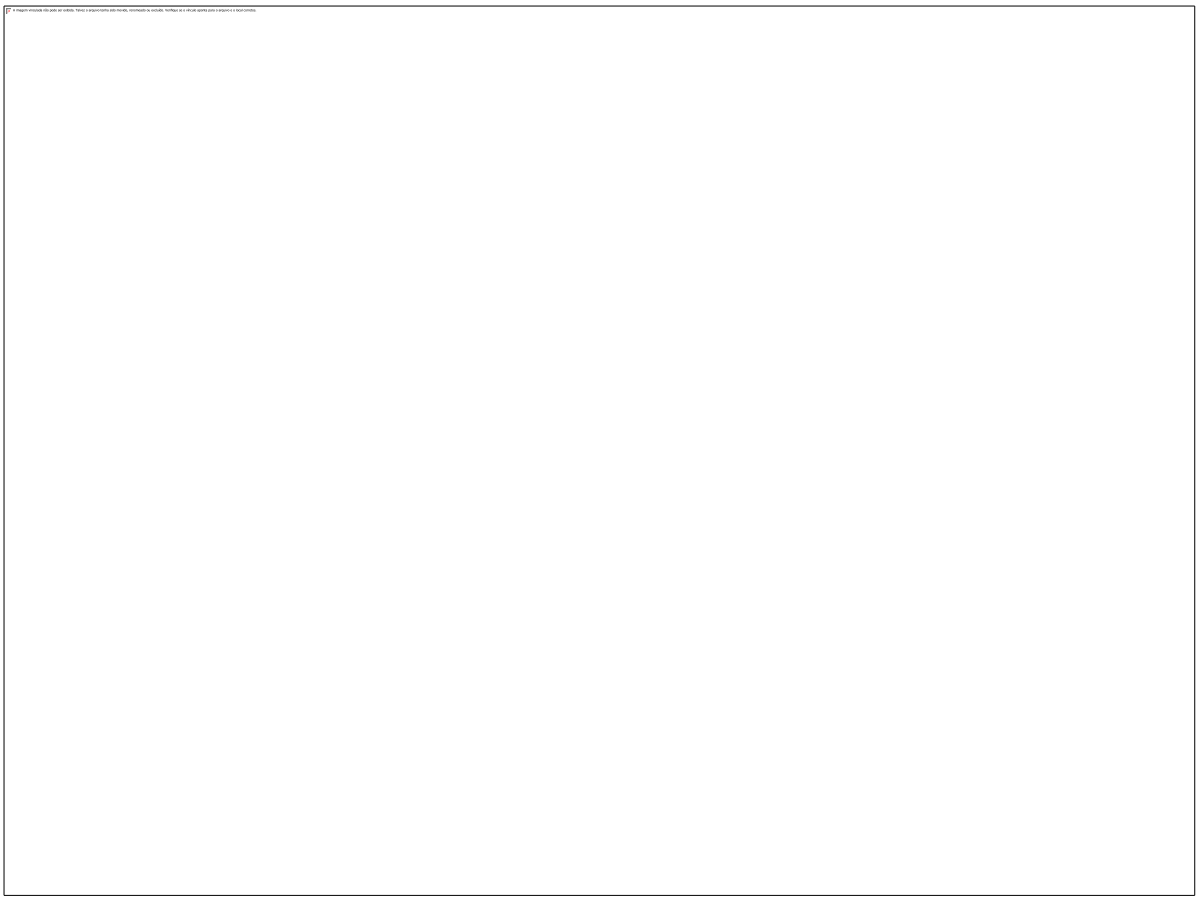


Diagrama 2

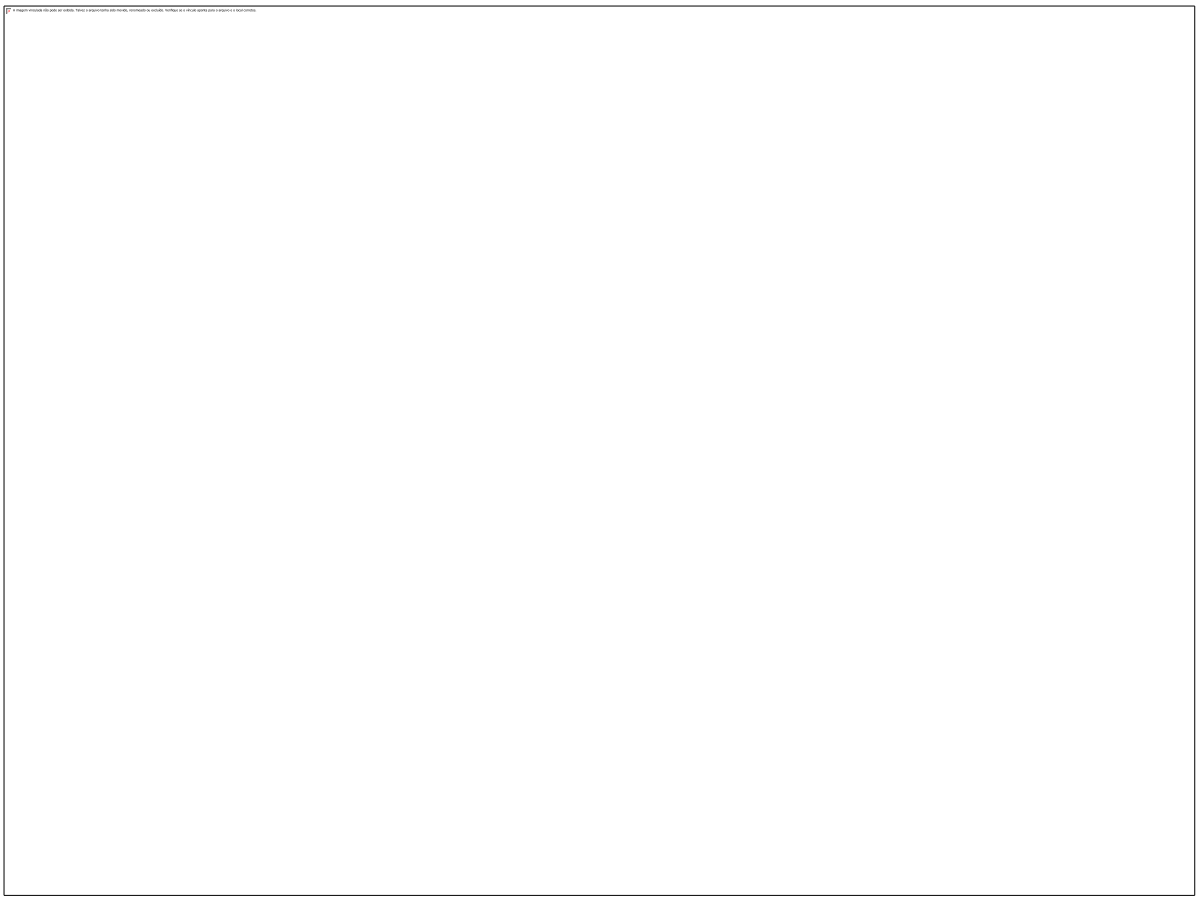


Diagrama 2

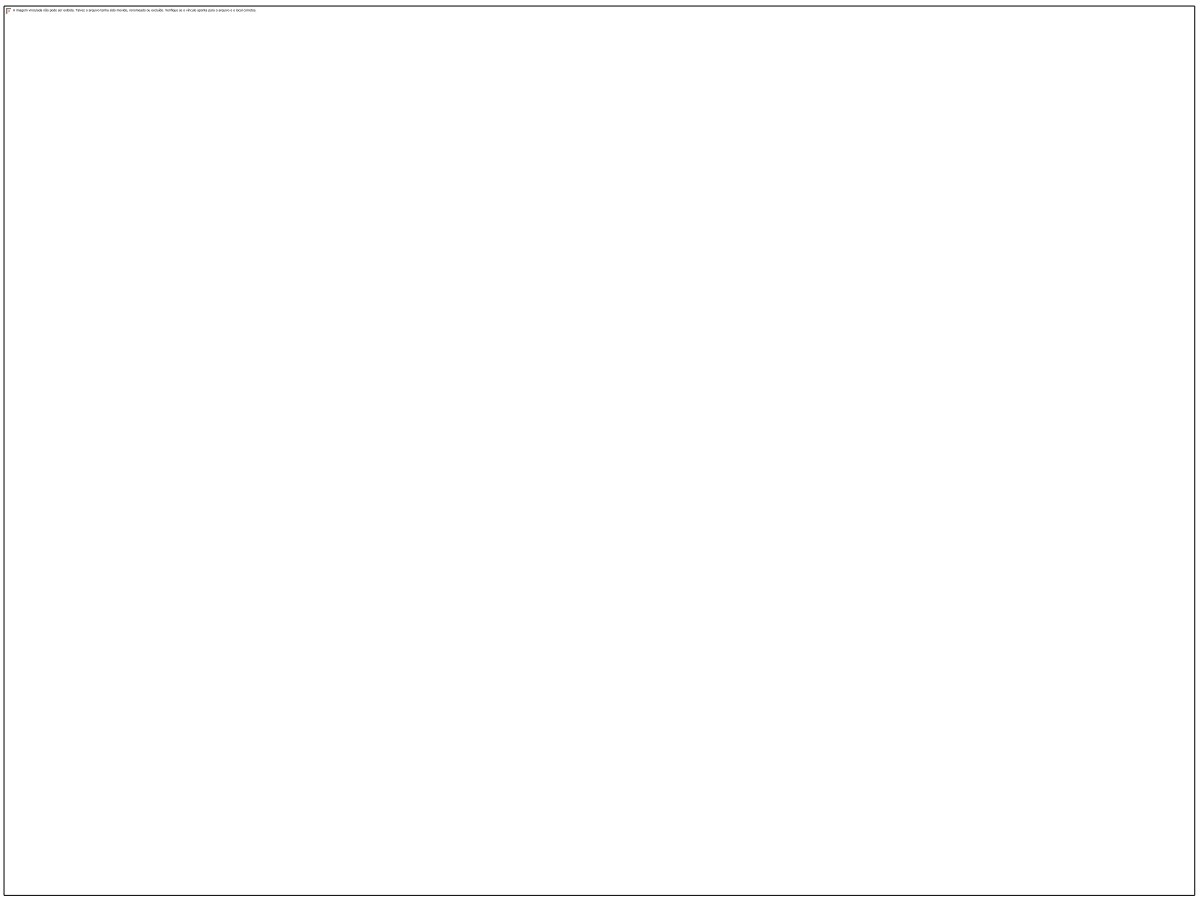


Diagrama 2

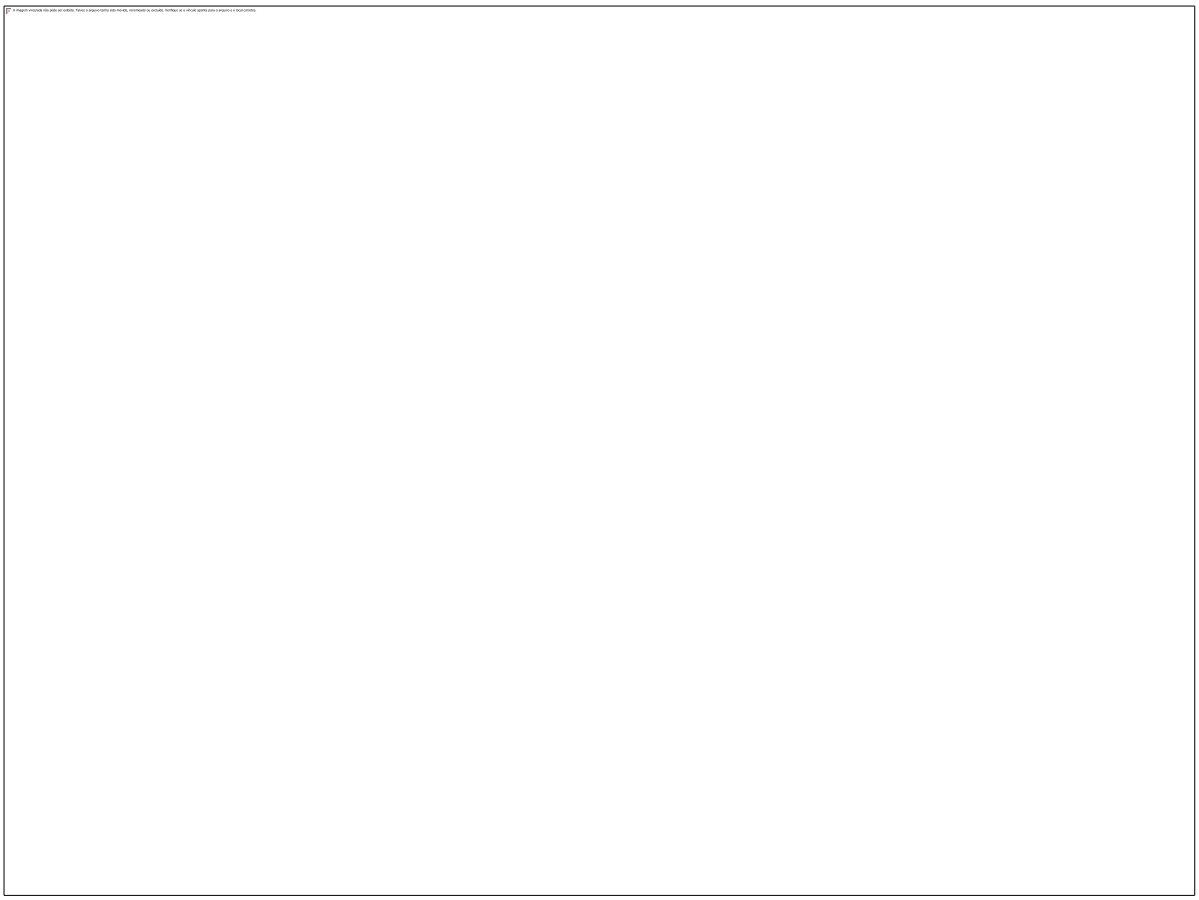


Diagrama 2

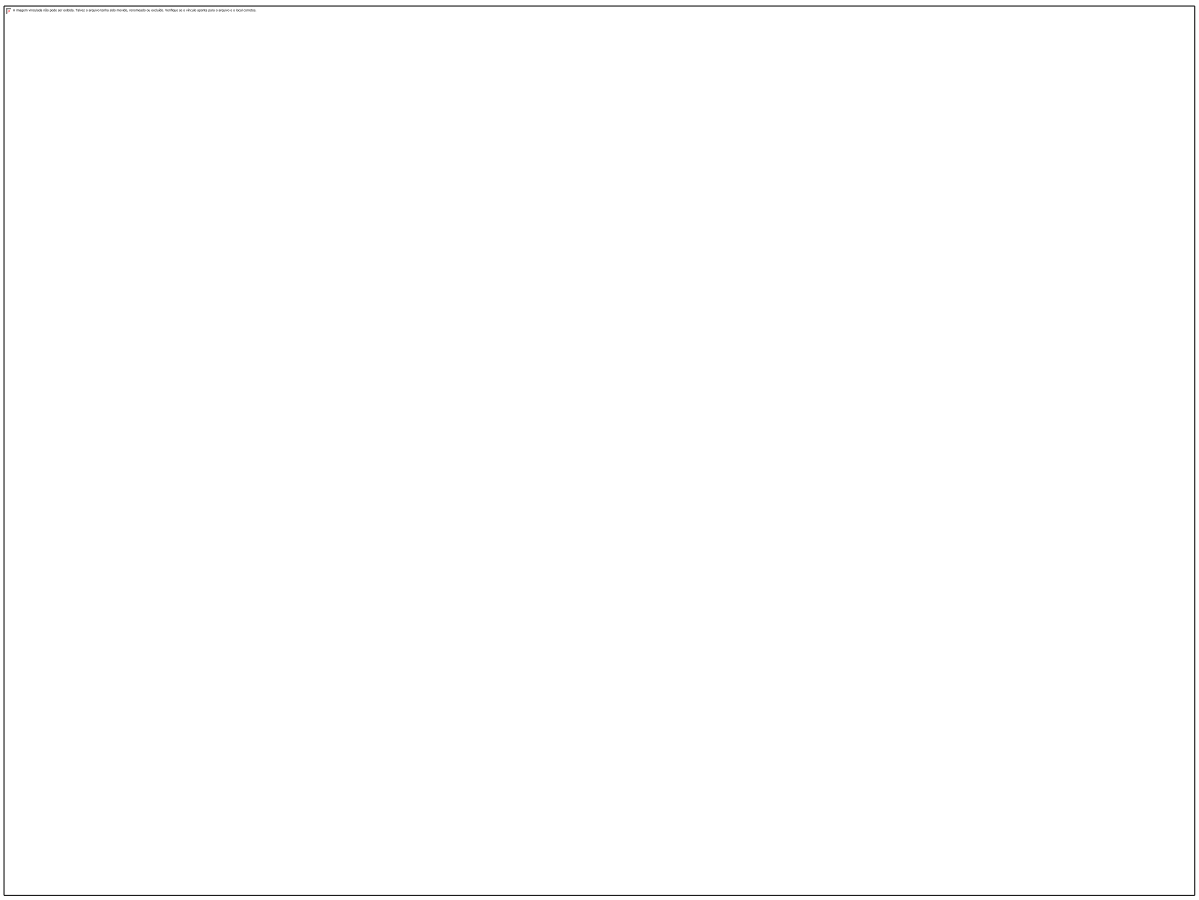


Diagrama 2

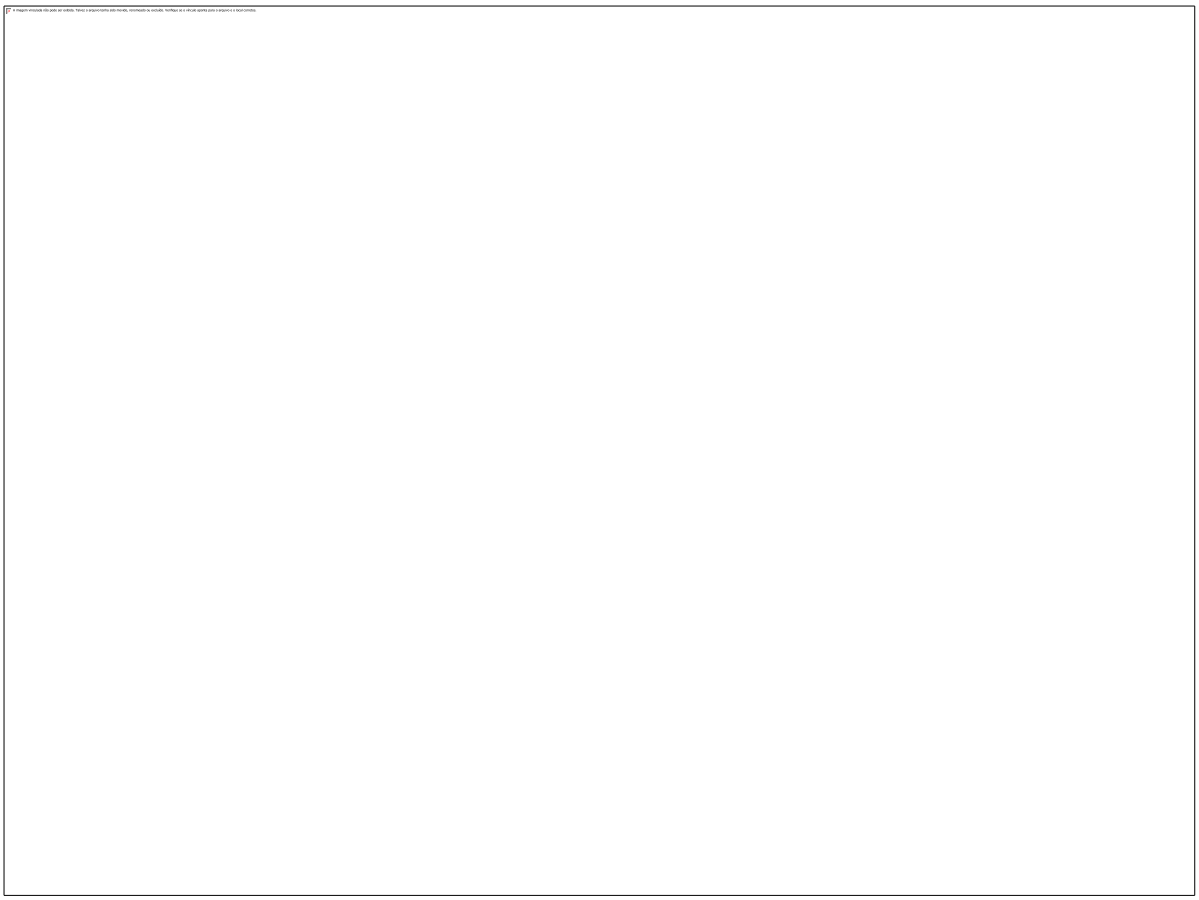


Diagrama 2

CÓDIGO: ET0408

AUTOR: ANDREI RAÍ NUNES DE ARAÚJO

ORIENTADOR: LUIZ FELIPE DE QUEIROZ SILVEIRA

TÍTULO: Compressão de Séries Temporais para Detecção de Dados Sensoriais em Sistemas de Manutenção Preditiva

Resumo

Este trabalho investiga o impacto da compressão de sinais de vibração na classificação de falhas em máquinas elétricas rotativas. A análise utilizou o conjunto de dados de falhas em rolamentos da Case Western Reserve University (CWRU). Os sinais foram comprimidos pelo algoritmo Swinging Door, reconstruídos por interpolação linear e empregados no treinamento, validação e teste de uma rede neural convolucional unidimensional (1D-CNN). Os resultados indicam desempenho satisfatório mesmo sob níveis expressivos de compressão, especialmente entre 60\% e 70\%, sugerindo preservação de informações discriminativas relevantes para manutenção preditiva em cenários com restrições de armazenamento, processamento ou transmissão.

Palavras-chave: Compressão de dados, diagnóstico de falhas, máquinas rotativas

TITLE: Fault Detection in Swinging Door-Compressed Vibration Signals Using 1D-CNN

Abstract

This study investigates the impact of vibration signal compression on fault classification in rotating electrical machines. The analysis utilized the Case Western Reserve University (CWRU) bearing fault dataset. The signals were compressed using the Swinging Door algorithm, reconstructed via linear interpolation, and used to train, validate, and test a one-dimensional convolutional neural network (1D-CNN). The results indicate satisfactory performance even under significant compression levels particularly between 60% and 70% suggesting the preservation of discriminative information relevant to predictive maintenance in scenarios with storage, processing, or transmission constraints.

Keywords: Data compression, fault diagnosis, rotating machinery

Introdução

Motores de indução são amplamente utilizados no setor industrial, e sua operação contínua é fundamental para a estabilidade de linhas de produção. Falhas nesses sistemas podem ocasionar interrupções operacionais, perdas econômicas e riscos à segurança. Entre causas recorrentes de defeitos em máquinas rotativas, destacam-se as falhas em rolamentos. Como motores e máquinas rotativas podem operar continuamente por longos períodos, sistemas de monitoramento por vibração tendem a produzir grandes volumes de séries temporais. Esse cenário pode impor desafios práticos de armazenamento, transmissão e processamento dos dados. Nesse contexto, técnicas de compressão de séries temporais, como o algoritmo Swinging Door, tornam-se alternativas relevantes por reduzirem a quantidade de amostras armazenadas ou transmitidas a partir de uma tolerância de aproximação. Entretanto, em aplicações de diagnóstico de falhas, é necessário avaliar se a compressão preserva informações discriminativas suficientes para a classificação automática das condições da máquina. Paralelamente, métodos de aprendizado profundo têm se destacado no diagnóstico de falhas por aprenderem representações diretamente dos dados. Entre eles, redes neurais convolucionais são amplamente exploradas em sistemas eletro-mecânicos. Assim, este trabalho avalia em que medida séries temporais de vibração comprimidas pelo algoritmo Swinging Door preservam informações suficientes para o diagnóstico automático por uma 1D-CNN. Dessa forma, busca-se analisar o compromisso entre redução de dados e desempenho de classificação em uma configuração simples e reprodutível.

Metodologia

A integração entre compressão de sinais e classificação por redes neurais foi analisada de maneira conjunta, pois a compressão altera a representação dos dados de entrada e pode afetar os padrões aprendidos pelo classificador. Foram utilizados sinais da base CWRU, particularmente do ponto de medição Drive End, amostrados a 48 kHz, considerando quatro classes: condição normal, falha na pista interna (IR), falha no elemento rolante (B) e falha na pista externa na posição de 6 horas (OR6). Foram considerados diâmetros de falha entre 0,007 e 0,021 polegadas. O conjunto experimental considerou sinais originais e comprimidos com taxas-alvo de 30% a 90%. Para aproximar cada série da taxa desejada, empregou-se busca binária sobre a tolerância do Swinging Door. A taxa de compressão foi calculada pela saída do algoritmo, composta por pares de pontos, isto é, coordenadas temporais e amplitudes. Após a compressão, os sinais foram reconstruídos por interpolação linear, preservando a frequência de amostragem e o número original de amostras. Em seguida, foram segmentados em janelas de 1024 amostras, com preenchimento por zeros quando necessário. Para a classificação, utilizou-se uma rede neural convolucional unidimensional com arquitetura. O treinamento foi conduzido com 50 épocas, lote com 500 instâncias, taxa de aprendizado inicial de 0,01, entropia cruzada e otimizador Adam com decaimento de peso igual a $5 \cdot 10{-}4$. Também foi empregado ReduceLROnPlateau, com paciência 3; a Leaky ReLU utilizou inclinação 0,01, e o dropout adotado foi igual a 0,01.

Resultados e Discussões

Durante a compressão, foram registrados os valores de tolerância e as taxas efetivamente obtidas. Após os experimentos, avaliou-se a acurácia no conjunto de teste para cada taxa de compressão. Os resultados indicam que, até a faixa entre 60% e 70% de compressão, o classificador mantém desempenho satisfatório, preservando informações relevantes para identificar as classes de falha e reduzindo o volume de dados armazenado ou transmitido.

Conclusão

Neste trabalho, avaliou-se o desempenho de um classificador baseado em aprendizado profundo aplicado a sinais de vibração comprimidos pelo algoritmo Swinging Door. A principal contribuição do estudo está na avaliação de um pipeline simples para diagnóstico de falhas a partir de séries temporais comprimidas, combinando o algoritmo Swinging Door, reconstrução por interpolação linear e classificação direta por uma 1D-CNN. Em contraste com abordagens que utilizam representações tempo-frequência ou procedimentos específicos de pareamento entre compressão e arquitetura convolucional, a estratégia adotada aqui opera diretamente sobre sinais unidimensionais reconstruídos. Os resultados indicam que, para a base CWRU analisada, taxas de compressão entre 60% e 70% ainda preservam padrões discriminativos suficientes para manter desempenho elevado de classificação, enquanto compressões mais severas tendem a degradar a acurácia.

Referências

[1] W. A. Smith and R. B. Randall, “Rolling element bearing diagnostics using the case western reserve university data: A benchmark study,”Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 64–65, pp. 100–131,2015. [2] X. Zhang, W. Liang, Y. Qu, X. Wang, and S. Huang, “Motor fault diagnosis based on time–frequency swinging door algorithm and convolutional kernel receptive field matching framework,” IEEE Transactions on Reliability, vol. 73, no. 3, pp. 1581–1591, 2024. [3] L. Zhang, Q. Fan, J. Lin, Z. Zhang, X. Yan, and C. Li, “A nearly end-to-end deep learning approach to fault diagnosis of wind turbine gearboxes under nonstationary conditions,” Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 119, p. 105735, 2023. [4] Case Western Reserve University Bearing Data Center, “48k Drive End Bearing Fault Data,” Case School of Engineering,Case Western Reserve University. [Online]. Available:https://engineering.case.edu/bearingdatacenter/48k-drive-end-bearing-fault-data

CÓDIGO: ET0416

AUTOR: RAFAEL SALES DE ALMEIDA CAVALCANTI

ORIENTADOR: FABIO MENEGHETTI UGULINO DE ARAUJO

TÍTULO: Equipamentos Baseadas em Plataformas de Desenvolvimento para Auxílio ao Ensino de Engenharia: Uma Abordagem de Educação Maker

Resumo

A formação contemporânea em engenharia enfrenta o desafio histórico de superar a dissociação entre a fundamentação teórica abstrata e a experimentação prática, fator frequentemente associado à desmotivação e aos índices de evasão discente no ensino superior. Em resposta a essa lacuna e aos elevados custos de bancadas industriais fechadas, a Educação Maker desponta como uma abordagem ativa eficaz, centrada na construção de artefatos tangíveis por meio de ferramentas de código aberto e baixo custo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação técnica de um protótipo didático de servomecanismo voltado ao ensino prático de automação e controle de processos, inserido nas atividades do Laboratório de Controle de Processos do Departamento de Engenharia de Computação e Automação (DCA/UFRN). O hardware é composto por um microcontrolador ESP8266, um módulo driver em ponte H MX1508 e um motor de corrente contínua GA25-370 (6 V, 380 RPM) instrumentado com encoder magnético incremental de quadratura. Todos os componentes foram adquiridos com recursos próprios do pesquisador. O circuito eletrônico foi projetado e roteado no software KiCad e consolidado por soldagem para garantir estabilidade operacional, aguardando a finalização de um gabinete protetor sob medida em impressão tridimensional.

Palavras-chave: Educação Maker. Ensino de Engenharia. ESP8266. WebSocket. Controle.

TITLE: Platform-Based Development Equipment to Aid Engineering Education: A Maker Education Approach

Abstract

A formação contemporânea em engenharia enfrenta o desafio histórico de superar a dissociação entre a fundamentação teórica abstrata e a experimentação prática, fator frequentemente associado à desmotivação e aos índices de evasão discente no ensino superior. Em resposta a essa lacuna e aos elevados custos de bancadas industriais fechadas, a Educação Maker desponta como uma abordagem ativa eficaz, centrada na construção de artefatos tangíveis por meio de ferramentas de código aberto e baixo

custo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação técnica de um protótipo didático de servomecanismo voltado ao ensino prático de automação e controle de processos, inserido nas atividades do Laboratório de Controle de Processos do Departamento de Engenharia de Computação e Automação (DCA/UFRN). The hardware consists of a ESP8266 microcontroller, an MX1508 H-bridged driver module and a GA25-370 (6 V, 380 RPM) direct current motor instrumented with an incremental quadrature magnetic encoder. All components were acquired with the researcher's own resources. The electronic circuit was designed and routed in the KiCad software and consolidated by soldering to ensure operational stability, awaiting the completion of a custom-made protective enclosure in three-dimensional printing.

Keywords: Maker Education. Engineering Education. ESP8266. WebSocket. Control.

Introdução

A formação do engenheiro no contexto contemporâneo exige o desenvolvimento contínuo de competências práticas, autonomia resolutiva e flexibilidade diante de transformações tecnológicas dinâmicas de acordo com (LOUREIRO, 2014). No entanto, um dos gargalos históricos consolidados nos currículos de graduação em engenharia no Brasil reside na dissociação entre a formação teórica e a prática experimental (FEISEL; ROSA, 2005). O modelo estritamente expositivo e formalista, centrado na reprodução mecânica de deduções matemáticas e listas de problemas, tem se mostrado insuficiente para engajar os discentes, contribuindo diretamente para a desmotivação e os elevados índices de retenção e evasão discente nos cursos das áreas tecnológicas (MARTINS et al., 2023).

Para mitigar esse distanciamento entre abstração e realidade industrial, as bancadas e plantas didáticas experimentais assumem papel nuclear no processo de ensino-aprendizagem (FEISEL; ROSA, 2005). Elas atuam como instrumentos de mediação que permitem analisar, validar e consolidar conceitos abordados em sala de aula. Todavia, os laboratórios universitários tradicionais frequentemente se deparam com limitações como o alto custo de aquisição e manutenção de bancadas comerciais proprietárias, a escassez de espaço físico e o caráter de "caixa-preta" de tais equipamentos, que inibe o contato direto dos estudantes com o nível de circuito e instrumentação (ALMEIDA et al., 2017).

Como alternativa epistemológica e prática a esse cenário, a Educação Maker desponta como uma abordagem transformadora no ensino superior de engenharia (CARVALHO, 2024). Alinhada às teorias construcionistas e ao princípio do aprender fazendo (learning by doing), essa vertente propõe que o conhecimento seja consolidado a partir da concepção, prototipagem e teste de artefatos tangíveis e compartilháveis (RESNICK, 2017) Em conjunto com a democratização das tecnologias de fabricação digital e das plataformas de código aberto, o movimento viabiliza o desenvolvimento de ferramentas pedagógicas transparentes, acessíveis e altamente customizáveis.

Nesse panorama, plataformas abertas de desenvolvimento como Arduino e módulos dotados de conectividade Wi-Fi, como a família ESP (ESP8266 e ESP32), tornaram-se vetores essenciais de inovação didática. Elas viabilizam a convergência entre eletrônica,

instrumentação, sistemas embarcados e Internet das Coisas (IoT) a uma fração dos custos industriais convencionais (MARTINS et al., 2023).

O presente projeto de pesquisa insere-se diretamente na temática e tem o objetivo de propor o ensino de controle através da metodologia maker, com foco na investigação, concepção e validação de equipamentos didáticos abertos baseados em microcontroladores sob a ótica da Educação Maker. Essa proposta fundamenta-se na continuidade de desenvolvimento em um projeto anterior de iniciação cientificação realizado no Laboratório de Controle de Processos do Departamento de Engenharia de Computação e Automação (DCA/UFRN) em 2025 e apresentado no cict 2025, materializando-se em uma planta eletromecânica didática compacta composta por um microcontrolador ESP8266, um driver de potência MX1508 e um motor DC com caixa de redução GA25-370 (6V, 380 RPM) instrumentado com encoder incremental de quadratura.

Diferencialmente das abordagens seriais tradicionais de aquisição, o projeto incorpora uma arquitetura de controle baseada no protocolo WebSocket, estabelecendo um canal bidirecional de baixa latência entre o microcontrolador e navegadores web. Essa integração permite transformar qualquer computador ou dispositivo móvel conectado à rede em um supervisório didático em tempo real, propiciando práticas de identificação de sistemas, projeto de controladores em malha fechada (PID) e automação distribuída com potencial de aplicação tanto em bancadas laboratoriais físicas quanto em dinâmicas de experimentação remota contextualizada

Metodologia

O desenvolvimento deste plano de trabalho adota uma abordagem de pesquisa aplicada e experimental no âmbito do Laboratório de Controle de Processos do Departamento de Engenharia de Computação e Automação (DCA/UFRN). O percurso metodológico orienta-se pelos fundamentos da Educação Maker e do construcionismo, estruturando-se em torno do ciclo de experimentação e aprimoramento contínuo para transformar teorias abstratas de engenharia em práticas tangíveis de laboratório (RESNICK, 2017). Dessa forma, a investigação articula o projeto de circuitos eletrônicos, a programação de sistemas embarcados e a validação didática de um servomecanismo de controle de velocidade e posição.
No que tange aos materiais e equipamentos de hardware, a concepção do protótipo priorizou componentes modulares de arquitetura aberta e baixo custo, facilitando a ampla replicação e a transparência instrumental (GREGORY, 2020). Cabe destacar que a totalidade dos equipamentos, atuadores e sensores foi adquirida integralmente com recursos próprios do pesquisador, o que evidencia a sustentabilidade financeira, a autonomia executiva e o caráter democrático da solução perante as habituais restrições orçamentárias das instituições de ensino superior (CARVALHO, 2024). O núcleo de processamento e conectividade é constituído pelo microcontrolador ESP8266, operando em frequência de até 160 MHz com interface de rede sem fio integrada no padrão 802.11 b/g/n. Como atuador eletromecânico e elemento sensor acoplado, emprega-se um motor de corrente contínua com caixa de redução metálica modelo GA25-370, projetado para tensão nominal de 6 V e rotação em vazio de 370 RPM, dotado de encoder magnético incremental de quadratura em seu eixo traseiro. O acionamento de

potência é realizado por um módulo em ponte H baseado no circuito integrado MX1508, o qual utiliza transistores MOSFET internos com capacidade de até 1,5 A por canal e ampla faixa de tensão operacional, alimentado por fonte externa regulada independente para mitigar ruídos elétricos no microcontrolador.
No âmbito das técnicas e ferramentas de software, o firmware do ESP8266 foi codificado em linguagem C/C++ por meio da IDE do Arduino, estruturado de modo modular e acessível aos estudantes de graduação (MARTINS et al., 2023). A aquisição de pulsos do encoder é executada por meio de rotinas de interrupção externa por hardware (ISR), viabilizando a mensuração precisa da frequência e do sentido de giro sem sobrecarregar o ciclo principal de processamento. A modulação por largura de pulso (PWM) é empregada para regular de maneira contínua a tensão média entregue à armadura do motor pelo driver MX1508, constituindo a variável manipulada do processo.

Resultados e Discussões

Os ensaios realizados até o presente momento concentraram-se na validação técnica e operacional da bancada eletromecânica desenvolvida. Do ponto de vista de hardware e firmware, os testes em bancada comprovaram o pleno funcionamento integrado do sistema: o microcontrolador ESP8266 executa a leitura fidedigna dos pulsos do encoder de quadratura por meio de interrupções de hardware, ao mesmo tempo em que comanda a modulação por largura de pulso (PWM) aplicada ao driver MX1508 para acionamento do motor de corrente contínua GA25-370. A substituição da montagem provisória em matriz de contatos pelo circuito esquematizado e roteado no software KiCad, com componentes devidamente soldados, eliminou problemas recorrentes de mau contato elétrico e ruídos de chaveamento. Atualmente, a planta encontra-se totalmente operacional em bancada, restando apenas a impressão tridimensional do gabinete sob medida para encapsular e proteger a placa de circuito eletrônico.
No âmbito da infraestrutura de rede, confirmou-se a viabilidade do protocolo WebSocket para comunicação contínua entre a camada embarcada e o ambiente do usuário. A arquitetura estabelecida requer a presença de um servidor de rede dedicado para mediar a troca de mensagens sobre conexão TCP/IP, ao qual conectam-se simultaneamente o ESP8266 e a aplicação executada no navegador web. Por intermédio desse canal bidirecional de baixa latência, os dados de telemetria da rotação são exibidos dinamicamente na tela do navegador, enquanto os comandos de acionamento e parâmetros operacionais enviados pelo usuário são repassados ao microcontrolador sem atrasos perceptíveis.
É fundamental ressaltar, contudo, que os resultados obtidos até esta etapa atestam exclusivamente a conformidade técnica, eletromecânica e de conectividade do protótipo. Não houve, até o momento, a realização de experimentos com turmas de estudantes para avaliar formalmente a eficácia pedagógica da ferramenta, a facilidade de assimilação conceitual ou o impacto educacional da abordagem maker frente às metodologias tradicionais. A aplicação de ensaios didáticos que envolvam a coleta de dados de percepção, a resolução de problemas práticos ou avaliações com discentes exige, obrigatoriamente, a submissão prévia e a aprovação do projeto perante o Comitê de Ética em Pesquisa (CEP), conforme preconizam as normativas éticas para pesquisas

envolvendo seres humanos no Brasil.
Dessa forma, a comprovação da funcionalidade do equipamento constitui o marco preparatório necessário para que o protocolo de pesquisa pedagógica seja submetido ao comitê de ética. Uma vez obtida a devida aprovação institucional, o plano de trabalho prevê a condução das intervenções experimentais com alunos de graduação nos laboratórios do DCA/UFRN, possibilitando mensurar de maneira rigorosa a contribuição do protótipo maker para o engajamento e a aprendizagem prática nas disciplinas de automação e controle.

Conclusão

O desenvolvimento deste trabalho demonstrou a viabilidade técnica e operacional da concepção de plantas didáticas de baixo custo fundamentadas na Educação Maker para o ensino de engenharia. A integração física entre o microcontrolador ESP8266, o driver de potência em ponte H MX1508 e o motor de corrente contínua GA25-370 com encoder incremental de quadratura resultou em um servomecanismo funcional e estável para estudos de controle e automação. O projeto eletrônico desenvolvido no KiCad e a consolidação das conexões por meio de soldagem definitiva conferiram robustez física à bancada, superando a instabilidade comumente associada ao uso de matrizes de contato provisórias (GREGORY, 2020). Além disso, a adoção do protocolo WebSocket sobre TCP/IP comprovou ser uma alternativa eficiente e moderna às comunicações seriais locais, viabilizando a supervisão bidirecional de dados em tempo real a partir de qualquer navegador web conectado a um servidor de rede local.
Ressalta-se que a totalidade dos materiais foi adquirida com recursos próprios do pesquisador, o que corrobora a acessibilidade e a reprodutibilidade da proposta como uma resposta viável às restrições orçamentárias frequentes no ensino superior público (CARVALHO, 2024). Contudo, os ensaios executados até a presente etapa atestam exclusivamente a conformidade técnica, funcional e computacional do protótipo. A avaliação formal do impacto educacional da ferramenta sobre a aprendizagem, motivação e retenção conceitual dos discentes ainda depende de etapas regulatórias obrigatórias.
Como trabalhos futuros e desdobramentos imediatos do plano de trabalho, prevê-se a fabricação por manufatura aditiva (impressão 3D) do gabinete de proteção sob medida para fechamento do circuito eletrônico, garantindo segurança operacional e ergonomia para o manuseio laboratorial. Em paralelo, será elaborado e submetido o protocolo de pesquisa ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP), cuja aprovação é pré-requisito indispensável para a realização de intervenções pedagógicas com seres humanos. Após a liberação ética, poderá ser conduzidos experimentos controlados com turmas de graduação no âmbito do Laboratório de Controle de Processos do DCA/UFRN, acompanhados da sistematização dos dados de aprendizagem, redação de artigo científico para submissão a periódico ou evento da área e elaboração do relatório técnico final de iniciação científica.

Referências

ALMEIDA, R. M. et al. Desenvolvimento de uma planta didática para o ensino de teoria de controle supervisório e sistemas a eventos discretos. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 13., 2017, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: SBA, 2017.

CARVALHO, A. B. A cultura maker na educação básica e no ensino superior: desafios e perspectivas a partir dos FAB LABs brasileiros. Texto Livre, Belo Horizonte, v. 17, e52809, 2024.

GREGORY, G. Kit didático modular para ensino utilizando Arduino. 2020. 48 f. Monografia (Graduação em Automação Industrial) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

LOUREIRO, Solange Maria; PEREIRA, Vera Lúcia Duarte do Valle; PACHECO, Waldemar. New profile training for engineers through incorporation of competences for sustainable development in engineering education. Interciencia Association. S.l., p. 821-828. 1 nov. 2014.

FEISEL, L. D.; ROSA, A. J. The role of the laboratory in undergraduate engineering education. Journal of Engineering Education, v. 94, n. 1, p. 121-130, 2005.

MARTINS, K. E. M. et al. Explorando o potencial do Arduino como ferramenta didática para a graduação em engenharia elétrica e biomédica. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE), 51., 2023, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: ABENGE, 2023.

RESNICK, M. Lifelong Kindergarten: Cultivating Creativity through Projects, Passion, Peers, and Play. Cambridge: MIT Press, 2017.

Anexos



Kicad

CÓDIGO: ET0420

AUTOR: OBERDAN PEREIRA GOMES

COAUTOR: LUIZ GABRIEL DE MELO LACERDA

COAUTOR: MARIANA MEDEIROS BATISTA

ORIENTADOR: SILVÂNIA LUCAS DOS SANTOS

TÍTULO: Caracterização do esgoto afluente a sistema UASB como etapa preliminar para produção e aproveitamento energético de biomassa algal

Resumo

As estações de tratamento de esgoto vêm sendo reformuladas como sistemas de recuperação de recursos, alinhadas à economia circular. Sistemas UASB seguidos por lagoas de polimento surgem como alternativa para produção de biomassa algal com potencial de aproveitamento energético via digestão anaeróbia. Conhecer o esgoto afluente é etapa fundamental para subsidiar as fases subsequentes do processo. Este estudo teve como objetivo caracterizar o esgoto afluente a dois reatores UASB (R1 e R2, 25 L cada, TDH de 6h) instalados na ETE do campus central da UFRN, em Natal/RN. Foram realizadas sete campanhas de coleta entre março e junho de 2026, com amostras simples coletadas pela manhã, analisando-se DBO, DQO, nitrogênio amoniacal, fósforo total, ortofosfato, alcalinidade e pH. Os resultados indicaram afluente de característica predominantemente doméstica, com DBO e DQO médias de 232 e 432 mg/L, e relação DBO/DQO de 0,58, evidenciando boa biodegradabilidade. Nitrogênio (44 mg/L) e fósforo (14 mg/L) apresentaram elevada variabilidade (CV de 45-50%), típica de esgotos institucionais. O pH manteve-se estável (média 7,22) e a alcalinidade total (213 mg CaCO3/L) indicou boa capacidade de tamponamento. Os resultados confirmam condições favoráveis à atividade anaeróbia e nutrientes suficientes para a futura produção de biomassa algal nas lagoas de polimento, estabelecendo linha de base para avaliação do potencial energético do sistema.

Palavras-chave: Tratamento anaeróbio. Recuperação de recursos. Produção energética.

TITLE: UASB Influent Wastewater Characterization as a Preliminary Step for Algal Biomass Production and Energy Recovery

Abstract

Wastewater treatment plants have been increasingly redesigned as resource recovery systems, aligned with the principles of the circular economy. UASB systems followed by polishing ponds have emerged as an alternative for algal biomass production, with potential for energy recovery through anaerobic digestion. Characterizing the influent wastewater is a fundamental step to support the subsequent stages of the process. This study aimed to characterize the influent wastewater of two UASB reactors (R1 and R2, 25 L each, HRT of 6 h) installed at the wastewater treatment plant of the Central Campus of the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN), in Natal, Brazil. Seven sampling campaigns were conducted between March and June 2026, with grab samples collected in the morning and analyzed for BOD, COD, ammoniacal nitrogen, total phosphorus, orthophosphate, alkalinity, and pH. The results indicated predominantly domestic characteristics of the influent, with mean BOD and COD concentrations of 232 and 432 mg/L, respectively, and a BOD/COD ratio of 0.58, indicating good biodegradability. Nitrogen (44 mg/L) and phosphorus (14 mg/L) showed high variability (CV of 45–50%), which is typical of institutional wastewater. The pH remained stable (mean of 7.22), while total alkalinity (213 mg $CaCO_3$/L) indicated good buffering capacity. The results confirm favorable conditions for anaerobic activity and sufficient nutrient availability for future algal biomass production in the polishing

Keywords: Anaerobic treatment. Resource recovery. Energy production.

Introdução

O tratamento de esgotos tem sido concebido ao longo do tempo com o objetivo de remover constituintes específicos, de modo a adequá-lo aos padrões de lançamento de efluentes vigentes. Entretanto, a crescente demanda por água, nutrientes e energia tem impulsionado uma mudança de paradigma, na qual as estações de tratamento de esgotos passam a ser projetadas como sistemas para recuperação de recursos, com potencial para recuperação da água, dos nutrientes, energia e demais produtos de interesse. Dessa forma, o esgoto deixa de ser um mero passivo ambiental e se consolida como um ativo econômico e energético, alinhado aos princípios da economia circular (Kehrein et al., 2020; Renfrew et al., 2022).

Nesse contexto, a aplicação de sistemas de tratamento com potencial para produção de biomassa algal, configura-se como uma estratégia promissora para ampliar a recuperação de recursos. As microalgas são organismos que utilizam os nutrientes presentes nos efluentes para seu crescimento, promovendo simultaneamente a remoção de nitrogênio, por exemplo, e gerando uma biomassa com potencial energético (Nagarajan, et al., 2020; Akdag, et al., 2026).

Entre as alternativas que possibilitam a integração entre sistemas de tratamento anaeróbio e cultivo de microalgas, os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (do inglês, Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB) seguidos por lagoas de polimento, vem ganhando destaque. Os reatores UASB promovem significativa remoção do material orgânico, enquanto mantém parte dos nutrientes no efluente, tornando necessário o pós-tratamento. A baixa carga orgânica, associada a baixa

turbidez (maior transparência) do efluente anaeróbio, quando aplicado nas lagoas, com reduzida profundidade, favorece a penetração da radiação solar resultando no desenvolvimento da atividade fotossintética das microalgas na massa líquida, contribuindo para a produção de oxigênio e para o estabelecimento de condições aeróbias ao meio (Cavalcanti, 2011; Vassalle et al., 2020; Van Haandel e Santos 2021a; Nascimento et al., 2022).

A biomassa algal produzida nas lagoas de polimento, embora represente um importante mecanismo de remoção e assimilação de nutrientes, pode constituir-se em um recurso passível de aproveitamento energético (Vassalle et al., 2020). Assim sendo, a recuperação e o aproveitamento dessa biomassa, por meio da digestão anaeróbia apresentam-se como alternativa promissora, uma vez que a matéria orgânica presente nas microalgas pode ser convertida em biogás, com potencial para geração de metano.

Contudo, o desempenho do processo depende das características do substrato, como sua composição e biodegradabilidade, bem como das condições operacionais empregadas, incluindo a relação entre o substrato e o inóculo. Deste modo, a caracterização da biomassa e a definição de estratégias adequadas para a sua recuperação constituem etapas fundamentais para avaliar seu potencial de aproveitamento energético. Estudos anteriores demostram ainda que a recuperação da biomassa algal produzida em sistema de tratamento anaeróbio empregando reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo seguido de lagoas de polimento em bateladas sequenciais (UASB-LPBS) pode ser favorecida pela aplicação de processos físico-químicos, como coagulação, floculação e sedimentação, etapas que se tornam relevantes quando se pretende utilizar a biomassa para posterior valoração energética (BATISTA, 2022).

Diante disso, conhecer as características dos esgotos afluentes ao sistema UASB-LPBS constitui uma etapa fundamental para o planejamento e avaliação das etapas subsequentes do processo, uma vez que a composição do afluente condiciona a remoção de matéria orgânica no reator anaeróbio e a disponibilidade de nutrientes no efluente que será destinado as lagoas de polimento. A caracterização do afluente permite, portanto, estabelecer uma condição de referência para o sistema, e assim, subsidiar a avaliação futura quanto a produção.

Metodologia

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido nas dependências da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do campus central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em Natal/RN, onde encontra-se instalado o sistema experimental.

2.1 Análises para caracterização do esgoto e monitoramento do UASB

O esgoto coletado nas dependências da ETE do Campus universitário Natal Central, passava pelas etapas de tratamento preliminar constituída por unidades de gradeamento e caixa de areia, seguindo para o tanque de acumulação de onde foram tomadas as

alíquotas para a sua caracterização, sendo também o local de onde o esgoto é bombeado para a alimentação dos reatores UASB.

Foram realizadas sete campanhas de coleta entre março e junho de 2026, com amostras simples, coletadas no período da manhã, entre 7h e 8h, as coletas e a preservação das amostras foram realizadas seguindo os protocolos indicados no Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (CETESB/ANA, 2011) e no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Apha; Awwa; Wef, 2023). As amostras foram acondicionadas em frascos de polietileno e transportadas em caixas térmicas imediatamente após a coleta até o Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (LARHISA), da UFRN, onde foram processadas para a determinação dos parâmetros físico-químicos, conforme descrição apresentada no Quadro 01.

Em três das sete campanhas realizadas, a determinação de parâmetros específicos como: DBO e fósforo total/ortofosfato, não pôde ser realizada em virtude de limitações laboratoriais, como indisponibilidade de reagentes e equipamentos que apresentaram.

Quadro 01: Parâmetros, métodos analíticos e referências utilizados para a caracterização do esgoto afluente ao reator UASB.

2.2 Concepção do sistema UASB

Para as etapas subsequentes das pesquisas (em andamento) foram instalados dois sistemas de tratamento anaeróbio do tipo UASB, denominados R1 (Reator 1) e R2 (Reator 2), operando em paralelo, com vazão contínua e sem descarte intencional de lodo.

Os reatores têm mesmo volume (25 L) e mesma configuração, denominado UASB-Y. O reator apresenta uma zona de digestão, localizada na parte vertical inferior da unidade e uma zona de separação na parte superior. Esta zona de separação se compõe de dois separadores bifásicos: um separador gás-líquido (biogás-efluente) e um separador líquido-sólido (efluente-lodo), localizada na parte lateral (braço do reator), como mostra a Figura 1. Essa configuração foi escolhida por ser de fácil concepção e baixo custo e ela já ter sido estudada pelo grupo de pesquisa, conforme dados apresentados por Santos (2016).

Os reatores foram confeccionados com tubos de PVC (policloreto de vinila), para o corpo principal (parte vertical), utilizou-se tubo de 150mm de diâmetro, com uma base fechada, também em PVC, chamada cap. Na lateral da base há uma entrada para o afluente que é conduzido através de uma tubulação externa e por gravidade entra no reator em fluxo ascendente. Ao longo do comprimento foram distribuídos registros de esfera, também em PVC, com diâmetro de ½", nos reatores R1 e R2, foram distribuídos 4 registros, distantes 22cm (Figura 1b). Estes registros possibilitavam a amostragem do perfil de lodo ao longo da zona de digestão.

Na parte superior utilizou-se uma junção simples de PVC (150x10mm) com ângulo de 45° ao qual conectou-se um tubo de 100 mm formando o braço do reator UASB-Y, que se constitui na zona de sedimentação, e é utilizado para o descarte do efluente. O dispositivo para separação e coleta do biogás, foi confeccionado manualmente com material plástico.

Figura 1. Foto e representação esquemática do sistema de tratamento experimental.

Fonte: Autores, 2026

Embora não tenha sido apresentado dados de desempenho dos reatores UASB (R1 e R2), eles encontram-se em operação desde maio de 2026. Ambos foram inoculados, com lodo proveniente de um sistema de tratamento anaeróbio do tipo UASB, que trata esgoto sanitário municipal, mesmo com a inoculação que objetiva acelerar o tempo de partida, o sistema ainda demanda tempo para alcançar a estabilidade, embora consideravelmente menor do que os relatados para sistemas sem inoculação. O esgoto afluente ao sistema de tratamento é o esgoto coletado nas diversas instalações do campus universitário e, antes de adentrar ao sistema de tratamento biológico, o esgoto passa por uma etapa de tratamento preliminar composta, por unidades de gradeamento e caixa de areia. O tempo de detenção hidráulica (TDH) aplicado aos reatores é de 6 horas, perfazendo uma capacidade de tratamento (vazão diária) de 100L, em cada reator. Este volume será suficiente para a alimentação das lagoas de polimento que serão instaladas como unidade de pós-tratamento. O bombeado é feito de forma contínua com uso de bombas peristálticas de vazão regulável (vazão máxima 16,4 L/h) do modelo ConceptPlus da marca ProMinent.

Resultados e Discussões

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização físico-química do esgoto afluente foi apresentada com uso da análise estatística descritiva básica contemplando tamanho amostral, média, mediana, desvio-padrão, amplitudes: máxima e mínima, o coeficiente de variação e o desvio padrão todos esses descritos na Tabela 01. A análise estatística desses parâmetros possibilitou a análise das suas características quanto a variabilidade da carga orgânica, nutrientes (N e P) e capacidade de tamponamento. Esse conjunto de parâmetros subsidiará a avaliação da composição e suas implicações para o tratamento biológico anaeróbio, uma vez que a eficiência e a estabilidade da microbiota dependem diretamente do controle das condições do meio.

3.1 Caracterização geral do esgoto afluente

A caracterização físico-química do esgoto afluente ao sistema UASB apresentou variação entre as campanhas de monitoramento, com amplitudes distintas entre os parâmetros avaliados, conforme apresentado na Tabela 01. A maior estabilidade foi observada para o pH, enquanto maiores coeficientes de variação foram registrados para fósforo, ortofosfato e nitrogênio amoniacal, seguido das frações de alcalinidade. A matéria orgânica, representada pela DQO, também apresentou variação entre as campanhas amostrais, evidenciando a heterogeneidade do esgoto analisado ao longo do monitoramento.

Tabela 01 – Resultados dos parâmetros físico-químicos monitorados e sua estatística descritiva básica.

Legenda: n: n° de análises realizada para o parâmetro; Mín.: valor mínimo; Máx.: valor máximo; CV: Coeficiente de variação; DP: Desvio padrão.

Para uma análise mais específica dos resultados e de suas implicações para o sistema UASB-LPBS, os parâmetros foram agrupados em função de suas características e importância no processo de tratamento.

3.2 Matéria orgânica e biodegradabilidade

Analisando os resultados das frações orgânicas para o afluente, obteve-se valores de médios de DBO e DQO de 232 mg/L e 432 mg/L, respectivamente. Estes resultados corroboram com dados apresentados na literatura para esgotos domésticos predominantemente doméstico (Von Sperling, 2014). Na Figura 02 apresenta-se um gráfico com os valores obtidos para DQO e DBO, nas sete coletas realizadas. Os dados mostram uma variabilidade temporal, principalmente quanto a DQO, essa variação pode estar associada as características do afluente que recebe contribuições majoritárias do restaurante universitário e da residência universitária, que podem sofrer oscilações ao longo do dia, dependendo dos horários de pico do uso, em etapas subsequentes da pesquisa pretende-se fazer o perfil do esgoto afluente, por meio de amostras compostas coletadas ao longo do dia.

Para a análise do teor de biodegradabilidade do esgoto, foi calculada a relação DBO/DQO, para as datas em que foi possível obter os dois dados. A relação DBO/DQO indica a capacidade de degradabilidade da matéria orgânica pelos micro-organismos, ou seja, até que ponto determinado esgoto é passível de degradação pela via biológica. O resultado médio obtido para o afluente foi de 0,58, evidenciando a capacidade de degradabilidade do afluente, fator de extrema relevância para sistemas biológicos, em especial, os reatores anaeróbios.

Figura 2. Variação de DBO e DQO. Fonte: Autores, 2026

3.3 Nitrogênio e fósforo

Em relação aos nutrientes, observou-se expressiva variação na concentração de nitrogênio amoniacal entre as campanhas, com valores entre 18,0 e 78 mg/L e média de 43,6 mg/L (Figura 3). A maior concentração foi registrada em 26/03, enquanto a menor ocorreu em 11/06, evidenciando a variabilidade das características do esgoto afluente ao longo do período monitorado. Essa variação pode estar associada à dinâmica de geração de esgoto no campus universitário, cuja contribuição está sujeita às características de ocupação e às atividades desenvolvidas ao longo do período. Entretanto, como não foram realizadas coletas em diferentes horários de um mesmo dia, não é possível avaliar a variabilidade diária da concentração desse constituinte.

Para o fósforo e o ortofosfato, determinados em quatro campanhas, foram observadas concentrações entre 6,0 e 20,0 mg/L e entre 5,0 e 14,0 mg/L, respectivamente. De modo geral, os dois parâmetros apresentaram comportamento semelhante ao longo das campanhas, com redução das concentrações entre 30/04 e 11/06 e posterior elevação em 18/06. A presença de fósforo, particularmente na forma de ortofosfato, apresenta relevância para a configuração UASB-LPBS estudada, uma vez que essa fração constitui uma forma de fósforo prontamente disponível para assimilação biológica, podendo contribuir para o desenvolvimento da biomassa microalgal nas lagoas de polimento.

No contexto do tratamento anaeróbio, a ocorrência simultânea de nitrogênio e fósforo no esgoto afluente evidencia a disponibilidade de nutrientes que, no contexto da configuração UASB-LPBS, é muito favorável ao processo. Após a etapa anaeróbia, a permanência de parte desses nutrientes no efluente poderá favorecer sua assimilação pela biomassa microalgal nas lagoas de polimento, convertendo parte desses

constituintes em biomassa com potencial de aproveitamento energético. Dessa forma, a caracterização do afluente estabelece uma condição de referência para avaliar, nas etapas subsequentes do estudo, a capacidade do sistema integrado em promover a recuperação de nutrientes por meio da produção de biomassa algal e seu posterior aproveitamento para produção de metano.

Figura 3. Concentração de nutrientes em função do tempo. Fonte: Autores, 2026
Como resultado, o reator UASB fornecerá um efluente rico em nutrientes, configurando um substrato ideal para as futuras lagoas de polimento. Dado que a síntese celular das microalgas ocorre de maneira mais eficiente a partir da assimilação direta de amônia e ortofosfato (Vassalle et al., 2020). o expressivo aporte desses compostos assegura o pleno suporte nutricional necessário para a contínua geração de biomassa.

3.4 Caracterização ácido-base do afluente
Dentre os parâmetros analisados na caracterização, a alcalinidade e o pH assumem particular importância para processos de tratamento anaeróbio, uma vez que estão diretamente relacionados às condições ácido-base do meio e à capacidade de tamponamento do sistema. Segundo van Haandel e van der Lubbe (2019), a digestão anaeróbia ocorre por meio de etapas metabólicas sequenciais, envolvendo hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, nas quais são formados e consumidos diferentes intermediários, incluindo os ácidos graxos voláteis (AGV). O acúmulo desses compostos, decorrente de um eventual desequilíbrio entre sua formação e consumo, pode promover a redução do pH e comprometer a atividade dos microrganismos metanogênicos. Nesse contexto, a alcalinidade, particularmente aquela associada ao sistema bicarbonato, desempenha importante função na neutralização dos ácidos produzidos e na manutenção das condições de pH favoráveis ao processo anaeróbio.

Os resultados apresentados na Figura 4 evidenciam que a alcalinidade a bicarbonato (AB) foi superior à alcalinidade associada aos ácidos voláteis (AAV) em todas as campanhas avaliadas, embora ambas as frações tenham apresentado variação entre o período de amostragem. A alcalinidade a bicarbonato variou de 82,6 a 257,7 mg $CaCO_3$/L, enquanto a AAV apresentou valores entre 30,0 e 98 mg $CaCO_3$/L. A relação AAV/AB variou de 0,28 a 0,59, indicando predominância da fração de bicarbonatos em relação à fração associada aos ácidos voláteis no afluente. Essa característica é relevante para o tratamento anaeróbio, uma vez que o sistema bicarbonato constitui importante mecanismo de tamponamento, contribuindo para amortecer alterações de pH decorrentes da formação dos ácidos intermediários durante a digestão anaeróbia.

Apesar da variabilidade observada nas frações de alcalinidade, o pH apresentou comportamento relativamente estável entre as campanhas, variando de 6,78 a 7,50, com média de 7,22. A manutenção do pH em uma faixa estreita, mesmo diante da variação das frações de alcalinidade, evidencia a capacidade tampão da matriz avaliada. Todavia, por se tratar de amostras do esgoto afluente, esses resultados devem ser interpretados como uma caracterização das condições iniciais de alimentação do sistema, não sendo suficientes, isoladamente, para inferir a estabilidade operacional do reator UASB, etapa que será realizada posteriormente, com a continuidade da pesquisa.

As características ácido-base observadas no afluente assumem importância para a etapa anaeróbia prevista no sistema UASB-LPBS, uma vez que a estabilidade do processo depende do equilíbrio entre a formação de ácidos intermediários e sua conversão nas

etapas subsequentes da digestão anaeróbia (Van Haandel e Van der Lubbe, 2019). A disponibilidade de alcalinidade a bicarbonatos no afluente pode contribuir significativamente para a capacidade de tamponamento do sistema, reduzindo a susceptibilidade a alterações bruscas de pH durante a operação. Assim, a caracterização dessas frações fornece uma condição de referência para o acompanhamento futuro do comportamento ácido-base do UASB, permitindo comparar as condições de alimentação com aquelas observadas durante a operação do reator.

As características do sistema ácido-base observadas no afluente do Campus Universitário apresentaram comportamento semelhante aos valores reportados por Batista (2022) e Santos e Van Haandel (2021) para esgotos domésticos municipais. A similaridade observada, associada à presença de nutrientes como nitrogênio e fósforo, indica que o afluente apresenta características compatíveis com aquelas observadas em esgotos domésticos e, potencialmente, condições favoráveis ao desenvolvimento de microalgas nas etapas subsequentes do sistema UASB-LPBS.

Figura 4. Caracterização ácido-base do esgoto afluente: pH, AB e AAV.
Fonte: Autores, 2026

Conclusão

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados obtidos para a caracterização preliminar do afluente que alimentará o sistema UASB-LPBS pode-se inferir que:

• Quanto a carga orgânica e biodegradabilidade, este apresenta relação DBO/DQO, média de 0,58, sendo por tanto favorável ao bom desempenho do sistema de tratamento biológico anaeróbio.

• A disponibilidade dos nutrientes nitrogênio e fósforo, no contexto da configuração UASB-LPBS, é muito favorável ao processo. A permanência de parte desses nutrientes no efluente poderá favorecer o enriquecimento da biomassa microalgal nas lagoas de polimento, convertendo parte desses constituintes em biomassa com potencial de aproveitamento energético.

• A disponibilidade de alcalinidade a bicarbonatos no afluente pode contribuir significativamente para a capacidade de tamponamento do sistema, reduzindo a susceptibilidade a alterações bruscas de pH durante a operação do sistema UASB-LPBS.

Tendo em vista a dinâmica de geração de esgoto no campus universitário, cuja contribuição está sujeita às características de ocupação e às atividades desenvolvidas ao longo do período, sugere-se a realização de monitoramento complementar em diferentes horários do dia, preferencialmente às 8h, 12h, 16h e 18h, a fim de caracterizar o perfil intradiário do esgoto afluente e identificar possíveis variações na concentração dos principais parâmetros físico-químicos. A caracterização da dinâmica diária do afluente poderá subsidiar a definição de estratégias de amostragem mais representativas, bem como o planejamento das condições operacionais do sistema UASB-LPBS,

especialmente quanto à disponibilidade de matéria orgânica e nutrientes para as etapas subsequentes de tratamento e produção de biomassa algal.

Referências

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKDAG, Y.; GUVEN, H.; ERSAHIN, M. E.; OZGUN, H. Sustainable wastewater management using microalgae: a review of pilot and full-scale applications. Journal of Water Process Engineering, v. 81, e109324, 2026.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Standard methods for the examination of water and wastewater. 24. ed. Washington, DC: APHA Press, 2023.

BATISTA, M. M. Lagoas de polimento em bateladas sequenciais aplicadas ao tratamento de efluente de reator UASB: operação, desempenho e pós-tratamento. 2022. Tese (doutorado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande - PB, 2022.

BUCHAUER, K. A comparison of two simple titration procedures to determine volatile fatty acids in influents to wastewater and sludge treatment processes. Water SA, v. 24, n. 1, p. 49-56, 1998.

CAVALCANTI, José Eduardo W. de A. Manual de tratamento de efluentes industriais. São Paulo: Engenho Editora Técnica, 2011.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 5.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB); AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011. 326 p.

KEHREIN, P.; VAN LOOSDRECHT, M.; OSSEWEIJER, P.; POSADA, J.; et al. A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants – market supply potentials, technologies and bottlenecks. Environmental Science: Water Research & Technology, v. 6, n. 4, p. 877-910, 2020.

NAGARAJAN, D.; LEE, D.-J.; CHEN, C.-Y.; CHANG, J.-S. Resource recovery from wastewaters using microalgae-based approaches: a circular bioeconomy perspective. Bioresource Technology, v. 302, e122817, 2020.

NASCIMENTO, A. R. M.; BATISTA, M. M.; SANTOS, S. L. dos. Balanço de oxigênio dissolvido em lagoas de polimento tratando efluente de reator UASB. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 27, n. 6, 2022.

RENFREW, D.; VASILAKI, V.; McLEOD, A.; LAKE, A.; DANISHVAR, S.; KATSOU, E. Where is the greatest potential for resource recovery in wastewater treatment plants? Water Research, v. 220, e118673, 2022.

SANTOS, S. L. Influência da geometria de reatores UASB em escala unifamiliar sobre seu desempenho no tratamento de esgoto. 2016. 154p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba.

SANTOS, S. L.; VAN HAANDEL, A. Nutrient Removal in Sequential Batch Polishing Ponds. Water, v. 13, n. 11, 2021.

VAN HAANDEL, A.; SANTOS, S. L. Transformação de lagoas de estabilização: reengenharia de um sistema obsoleto de tratamento de águas residuárias. Revista DAE, v. 69, n. 229, p. 6-24, 2021.

VAN HAANDEL, A.; VAN DER LUBBE, J. Anaerobic Sewage Treatment: Optimization of process and physical design of anaerobic and complementary processes. London: IWA Publishing, 2019.

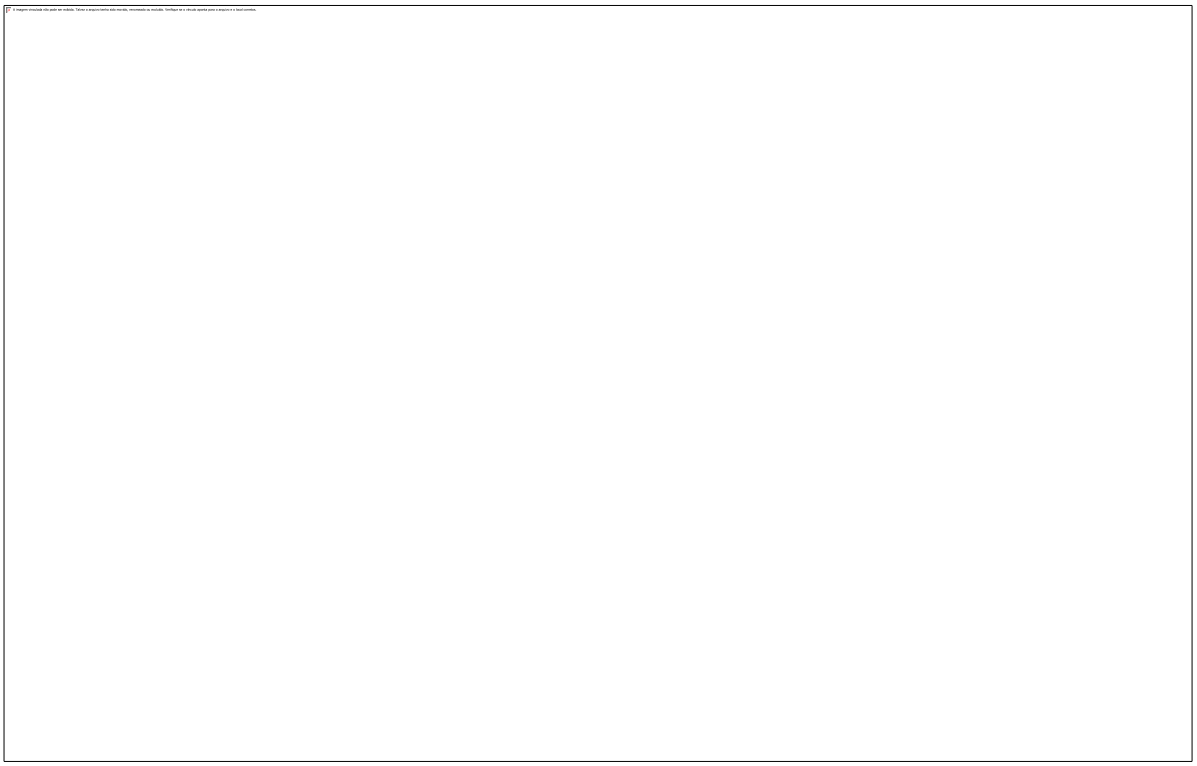
VASSALLE, L.; DÍEZ-MONTERO, R.; MACHADO, A. T. R.; MOREIRA, C.; FERRER, I.; MOTA, C. R.; et al. Upflow anaerobic sludge blanket in microalgae-based sewage treatment: co-digestion for improving biogas production. Bioresource Technology, v. 300, e122677, 2020.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1).

Anexos



Figura 1. Foto e representação esquemática do sistema de tratamento experimental.
Fonte: Autores, 2026



Quadro 01: Parâmetros, métodos analíticos e referências utilizados para a caracterização do esgoto afluente ao reator UASB.



Tabela 01 – Resultados dos parâmetros físico-químicos monitorados e sua estatística descritiva básica.

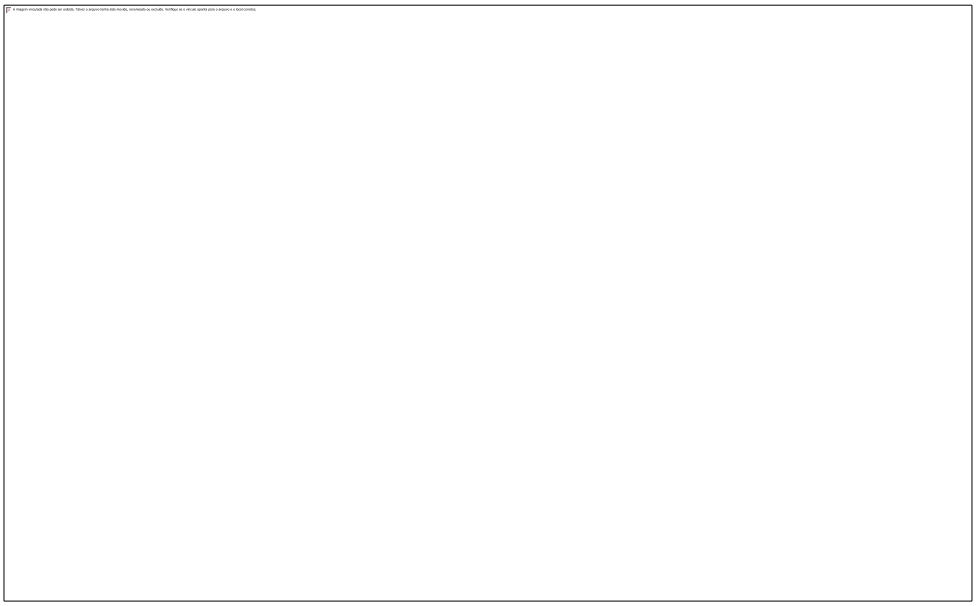


Figura 2. Variação de DBO e DQO. Fonte: Autores, 2026

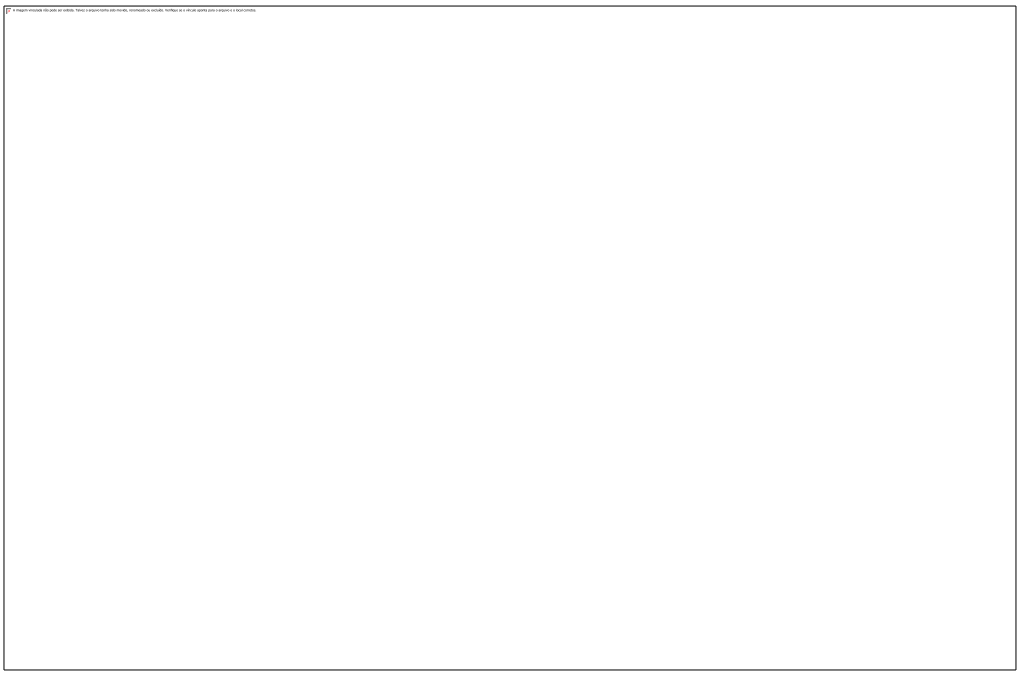


Figura 3. Concentração de nutrientes em função do tempo. Fonte: Autores, 2026

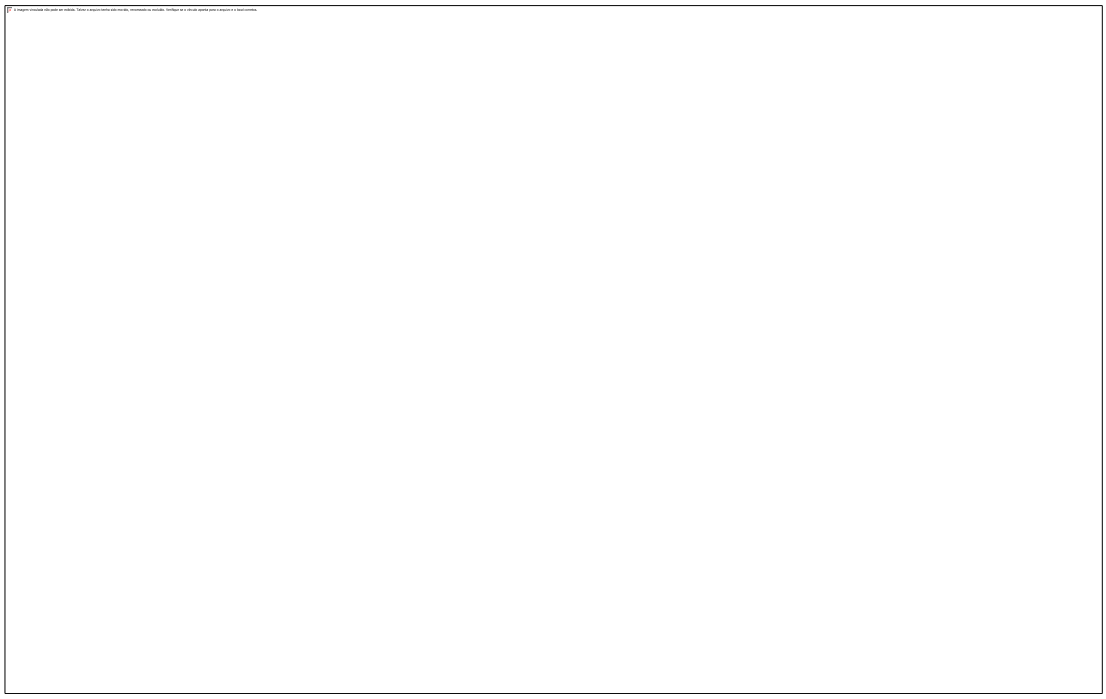


Figura 4. Caracterização ácido-base do esgoto afluente: pH, AB e AAV. Fonte: Autores, 2026

CÓDIGO: ET0450

AUTOR: KAYKY AUGUSTO DA SILVA

COAUTOR: MAYARA DE OLIVEIRA LESSA

ORIENTADOR: ANDRE LUIS LOPES MORIYAMA

TÍTULO: Análise Hidrodinâmica de Reatores Fotocatalíticos Aplicados ao Tratamento de Efluentes por Fluidodinâmica Computacional

Resumo

Este estudo avaliou o comportamento hidrodinâmico e a Distribuição do Tempo de Residência em reatores fotocatalíticos de placas destinados ao tratamento contínuo de efluentes, empregando a Fluidodinâmica Computacional no software livre OpenFOAM. Analisaram-se duas geometrias caracterizadas por 3 e 4 voltas, mantendo fixos o comprimento e a altura e variando a largura, o que resultou em volumes reacionais distintos. A malha tridimensional predominantemente hexaédrica associada ao modelo de turbulência k-epsilon RANS assegurou a estabilidade das simulações estáticas, seguidas do transporte transiente de traçador para a obtenção das curvas de E(t). Os resultados indicaram que o incremento do número de Reynolds promoveu o estreitamento das curvas de E(t), a redução expressiva da variância e o aumento consistente do número de Péclet e da quantidade de CSTRs ideais em série. O Reator 2 exibiu desempenho hidrodinâmico superior ao Reator 1, apresentando volume morto inferior a 1% em velocidades mais elevadas e comportamento mais próximo ao modelo de fluxo pistão. Conclui-se que a geometria com maior número de voltas otimiza o aproveitamento do volume útil e garante maior uniformidade de retenção, fornecendo subsídios para o dimensionamento e o aumento de escala desse tipo de reator.

Palavras-chave: Fluidodinâmica Computacional, Reatores fotocatalíticos, OpenFOAM

TITLE: Hydrodynamic Analysis of Photocatalytic Reactors for Effluent Treatment Using Computational Fluid Dynamics

Abstract

This study evaluated the hydrodynamic behavior and the Residence Time Distribution in plate photocatalytic reactors for continuous wastewater treatment, using Computational Fluid Dynamics in the open source software OpenFOAM. Two geometries characterized by 3 and 4 turns were analyzed, keeping length and height fixed while varying width, which resulted in distinct reaction volumes. The predominantly hexahedral three-

dimensional mesh combined with the RANS k-epsilon turbulence model ensured the stability of static simulations, followed by transient tracer transport to obtain E(t) curves. The results indicated that increasing the Reynolds number promoted the narrowing of E(t) curves, a significant reduction in variance, and a consistent increase in both the Péclet number and the quantity of ideal CSTRs in series. Reactor 2 displayed superior hydrodynamic performance compared to Reactor 1, presenting a dead volume below 1% at higher velocities and behavior closer to the plug flow model. It is concluded that the geometry with a higher number of turns optimizes useful volume utilization and ensures greater retention uniformity, providing valuable insights for photoreactor sizing and scaling up.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Photocatalytic reactors, OpenFOAM

Introdução

A crescente demanda por tecnologias eficientes e sustentáveis para o tratamento de águas residuárias tem impulsionado o desenvolvimento de processos capazes de remover contaminantes com menor geração de resíduos secundários e alta eficiência de degradação [1–4]. Entre as alternativas estudadas, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) destacam-se pela geração de espécies altamente reativas, especialmente o radical hidroxila (•OH), capazes de degradar compostos orgânicos de difícil remoção por processos convencionais [5,6].

Nesse contexto, a fotocatálise heterogênea tem recebido atenção pelo uso de semicondutores, como TiO_2, Nb_2O_5 e WO_3, associados à radiação para promover reações de oxidação e redução [3,7]. Apesar dos avanços obtidos em escala laboratorial, sua aplicação em sistemas de maior escala ainda é limitada por aspectos relacionados ao projeto e à operação dos reatores [8–10]. O aumento de escala exige a análise integrada dos fenômenos de transferência de quantidade de movimento, massa, radiação e reação [8–10].

Além do fotocatalisador e da fonte de radiação, a configuração do reator influencia diretamente seu desempenho. A geometria determina o percurso do fluido, afetando a mistura, a transferência de massa, a dispersão dos contaminantes e o contato com a superfície fotocatalítica [8,10,11]. Regiões estagnadas, recirculações, canalização e caminhos preferenciais podem produzir diferentes tempos de permanência e desvios do escoamento ideal [11–13]. Dessa forma, o projeto hidrodinâmico é fundamental para a avaliação de fotorreatores contínuos [8,10].

Entre as configurações empregadas, os reatores de placas apresentam elevada relação entre área superficial e volume e possibilitam a deposição do fotocatalisador em superfícies expostas à radiação. Entretanto, a distribuição do escoamento é condicionada

pela geometria do canal e pelos elementos internos utilizados para controlar o fluxo [10,14]. Chicanas podem intensificar a mistura e reduzir regiões de baixa renovação, mas também aumentar a não idealidade do reator [12,14]. Assim, seu projeto deve conciliar intensificação da mistura e distribuição adequada dos tempos de permanência.

A Distribuição do Tempo de Residência (DTR) constitui uma importante ferramenta para caracterizar o comportamento hidrodinâmico de reatores contínuos. Introduzida por Danckwerts [13], permite descrever a distribuição dos tempos de permanência e identificar fenômenos como dispersão axial, canalização, curto-circuito e regiões de retenção [12,13,15]. Em processos fotocatalíticos, sua análise é relevante, pois o tempo de permanência determina o período disponível para a interação do contaminante com o fotocatalisador e para as reações de degradação [8,10,12]. Assim, a DTR permite relacionar os fenômenos hidrodinâmicos ao desempenho do processo [10,12,15].

Nesse contexto, a Fluidodinâmica Computacional (CFD) permite descrever espacialmente os fenômenos de transporte, possibilitando analisar campos de velocidade, pressão e transporte de espécies [16,17]. A ferramenta identifica zonas de recirculação, baixa velocidade e padrões de escoamento, sendo relevante para otimizar fotorreatores [16,18,19]. Sua aplicação fornece uma base hidrodinâmica para futuras análises de transferência de massa, transporte de radiação e cinética fotocatalítica [18–20].

Para reatores de placas com chicanas, o número de Reynolds assume especial relevância, pois alterações no escoamento podem modificar a mistura, a dispersão e os tempos de permanência [11,12]. A associação entre CFD e DTR permite relacionar fenômenos locais de escoamento à não idealidade global do sistema [13,15,16]. Diante disso, este trabalho analisa, por CFD utilizando o OpenFOAM, a hidrodinâmica e a DTR de um reator de placas com chicanas, avaliando a influência do número de Reynolds sobre o escoamento, a dispersão e a não idealidade do sistema, visando sua aplicação em processos fotocatalíticos contínuos.

Metodologia

O dispositivo de fluxo contínuo proposto possui geometria retangular com dimensões externas fixas de 185 mm de comprimento e 92 mm de altura no Reator 1. A largura foi alterada de 92 mm para 114 mm no Reator 2, com o intuito de comparar o efeito das configurações geométricas de 3 e 4 voltas. A parte interna de cada reator conta com chicanas longitudinais de 154 mm de comprimento, responsáveis pelo direcionamento do fluido ao longo do percurso em serpentina. A geometria 2D e a malha computacional 3D do reator com 3 voltas estão representadas nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

A discretização espacial do domínio fluido foi realizada por meio da geração de uma malha tridimensional predominantemente hexaédrica no ambiente OpenFOAM, utilizando a ferramenta snappyHexMesh. As Figuras 3 e 4 apresentam a vista superior das malhas geradas para os Reatores 1 e 2, respectivamente, enquanto as principais características e os parâmetros de qualidade da malha computacional obtida estão sintetizados na Tabela 1.

A avaliação das métricas estruturais das malhas computacionais geradas para os Reatores 1 e 2 confirma a consistência metodológica na discretização do domínio fluido, onde a expansão da geometria de 3 para 4 voltas elevou o volume de 253,82 mL para 326,46 mL e o total de elementos de 862.306 para 1.093.567 células. Em ambos os modelos, manteve-se a predominância de células hexaédricas, restringindo as poliédricas às zonas de refinamento da camada limite e curvas, o que otimiza o tempo de processamento e reduz a difusão numérica. Quanto aos critérios de estabilidade no OpenFOAM, a não-ortogonalidade máxima foi de 27,69° com médias de 7,01° e 7,02° para os Reatores 1 e 2, situando-se amplamente abaixo do limite crítico de 70°; a razão de aspecto máxima permaneceu em 1,45, indicando elementos altamente isotrópicos; e a obliquidade máxima atingiu 0,35, valor bastante inferior ao valor limite de 4,0, garantindo a aprovação integral no utilitário checkMesh para o cálculo preciso do escoamento.

Como condições de contorno, adotou-se perfil de velocidade uniforme na entrada baseado nos números de Reynolds estudado, com pressão atmosférica na saída e paredes sob condição de não-deslizamento. A modelagem considerou escoamento isotérmico e incompressível de um fluido Newtoniano com as propriedades padrão da água (densidade de 1000 kg/m3 e viscosidade cinemática de 1x10-6 m2/s). Para simular a turbulência, foi adotada a abordagem RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) com o modelo clássico k-ε. O solver utilizado foi o simpleFoam da biblioteca padrão do OpenFOAM, que calcula escoamento estacionário, solucionando de forma acoplada às equações da continuidade representadas pela equação 1, e de conservação de momento linear, descrita pela equação 2, onde u representa o vetor velocidade, p denota a pressão cinemática, R é o tensor de tensões que engloba efeitos viscosos moleculares e os termos de Reynolds associados ao modelo de turbulência k-ε, e Su corresponde aos termos fonte de impulso.

Após atingir o estado estacionário, injetou-se um pulso de traçador com difusividade molecular de 10-9 m2/s por meio do solver transiente scalarTransportFoam da biblioteca padrão do OpenFOAM, que é governado pela equação de advecção-difusão (Equação 3), onde T denota a concentração do traçador, u representa o vetor velocidade obtido na etapa anterior, DT corresponde ao coeficiente de difusividade molecular e ST o termo fonte.

A análise da concentração de traçador na saída do reator ao longo do tempo permite calcular a distribuição tempo de residência E(t) e a distribuição cumulativa do traçador F(t). Os cálculos das funções foram realizados conforme as Equações 4 e 5. A partir da distribuição foi possível determinar o tempo médio de residência conforme a Equação 6.

A partir da distribuição normalizada e do tempo médio real, o grau de dispersão temporal do traçador foi quantificado pela variância da curva (σ2) (Equação 7), sendo o desvio padrão (σ) definido como a raiz da variância (Equação 8), enquanto a assimetria da distribuição foi avaliada pelo seu fator de distorção (s3) (Equação 9). Adicionalmente, o tempo espacial teórico (τ) foi definido pela razão entre o volume do reator e a vazão volumétrica do escoamento (Equação 10), estabelecendo a base de referência necessária para a posterior quantificação de volumes mortos e desvios de idealidade do sistema hidrodinâmico.

Para caracterizar os desvios de idealidade do escoamento, a fração de volume morto do reator foi estimada relacionando o tempo médio de residência experimental com o tempo espacial teórico (%Vd) Equação 11. O comportamento global de mistura foi modelado pela aproximação de tanques ideais em série, em que o número equivalente de reatores (N) foi determinado pela relação direta entre o tempo médio ao quadrado e a variância da curva (Equação 12). Por fim, a magnitude da dispersão axial foi avaliada de forma adimensional pelo número de Péclet (Pe), obtido através da resolução numérica do modelo de dispersão para reatores com fronteiras fechadas (Equação 13).

Resultados e Discussões

A partir dos dados de concentração do traçador na saída dos reatores em função do tempo, C(t), determinou-se a função distribuição do tempo de residência, E(t), por meio da equação 4. As curvas comparativas de E(t) reunindo os perfis de velocidade testados estão apresentadas na Figura 5 para o Reator 1, cobrindo a faixa de 50 a 500 mm/s, e na Figura 6 para o Reator 2, abrangendo de 50 a 250 mm/s.

A avaliação dos perfis de E(t) evidencia a influência direta do regime hidrodinâmico no tempo de retenção do fluido, aspecto crítico no dimensionamento e na eficiência de fotorreatores contínuos aplicados ao tratamento de efluentes [8, 9]. O incremento da velocidade promove um estreitamento acentuado das curvas, acompanhado pelo ganho de magnitude dos picos e por seu deslocamento para tempos inferiores. No Reator 1, a elevação da velocidade de 50 a 500 mm/s expande o valor máximo de E(t) de 0,030 s-1 registrado em 68 segundos para 0,235 s-1 em 8 segundos. No Reator 2, na faixa de 50 a 250 mm/s, a amplitude do pico passa de 0,022 s-1 em 82 segundos para 0,115 s-1 em 18 segundos. Essa transição indica que o domínio de forças inerciais reduz os efeitos de

misturação retrógrada e atenua a formação de curtos-circuitos hídricos e pontos de estagnação no meio reacional [11, 12].

Ao comparar o comportamento das duas geometrias sob a velocidade idêntica de 250 mm/s, o Reator 1 atinge picos de menor largura e maior amplitude, da ordem de 0,150 s-1 em 12 segundos, em contraste com o Reator 2, que registra 0,115 s-1 em 18 segundos. Esse contraste geométrico confirma que a configuração do Reator 2 impõe um tempo de permanência menos homogêneo às frações de fluido, desviando-se com maior intensidade do padrão ideal de escoamento pistão [11, 14]. Tal constatação é fundamental para reatores fotocatalíticos e processos oxidativos avançados, nos quais a distribuição uniforme do tempo de exposição à radiação e aos reagentes condiciona o desempenho global de degradação [3, 8, 10, 18].

Para quantificar de forma rigorosa essa resposta hidrodinâmica, foram calculados a fração de volume morto, a variância (σ2), o número equivalente de reatores CSTR em série (N) e o número de Peclet (Pe) [11, 12]. Os valores resultantes para cada número de Reynolds testado constam na Tabela 2 para o Reator 1 e na Tabela 3 para o Reator 2.

A evolução dos parâmetros listados nas Tabelas 2 e 3 ratifica a aproximação progressiva dos sistemas ao regime pistão à medida que o número de Reynolds se eleva, comportamento típico em reatores tubulares voltados à purificação de água e tratamento de efluentes [5, 6, 8]. No Reator 1, a elevação de Re de 165,8 para 994,7 resulta em um expressivo declínio da variância, caindo de 624,67 para 10,75 s2. Esse ganho em uniformidade temporal reflete-se na ascensão contínua de Pe de 20,26 a 33,59 e no aumento de N de 10,65 para 17,31 tanques ideais em série [11, 12]. Paralelamente, a zona inerte permaneceu em níveis insignificantes em toda a faixa operacional, não ultrapassando 4,35% do volume total.

O Reator 2 demonstra uma trajetória similar de alinhamento à idealidade no intervalo de Re entre 165,8 e 828,9, no qual a variância decresce de 15060,5 para 21,69 s2 e o índice de Peclet alcança 39,37. Contudo, em regimes de menor escoamento, a elevada variância do Reator 2 evidencia uma marcante heterogeneidade na retenção do traçador, fruto da resposta hidrodinâmica de sua geometria frente a baixas velocidades [14, 15]. A porção de volume inativo manteve-se reduzida na maioria dos ensaios, exibindo apenas uma oscilação em Re igual a 331,6, ponto onde atingiu 9,43% e provocou um desvio momentâneo nos índices N e Pe. Essa caracterização detalhada permite correlacionar o design físico à eficiência de contato dos reagentes, pré-requisito essencial para o escalonamento seguro de reatores aplicados no tratamento descentralizado de águas residuárias [2, 9, 10].

Conclusão

A análise hidrodinâmica via fluidodinâmica computacional (CFD) com o software OpenFOAM demonstrou ser eficaz para caracterizar o escoamento no fotorreator. A abordagem numérica permitiu compreender o transporte de massa ao longo dos canais em placa onde o catalisador está depositado. Os resultados evidenciaram que a elevação do número de Reynolds promove a aproximação progressiva do sistema ao modelo de fluxo pistão (PFR), comportamento refletido pelo estreitamento das curvas de E(t), pela acentuada redução da variância e pelo incremento consistente do número de Péclet e da quantidade de CSTRs ideais em série. Essa transição hidrodinâmica minimiza zonas de estagnação e assegura um tempo de residência mais uniforme sobre a superfície catalítica, aspecto essencial para maximizar a eficiência fotocatalítica.

Na avaliação comparativa, o Reator 2 apresentou desempenho hidrodinâmico superior ao Reator 1 em toda a faixa operacional analisada. O Reator 2 exibiu um desenvolvimento de fluxo mais adequado, atingindo volume morto inferior a 1% nas velocidades mais elevadas, o que otimiza o aproveitamento do volume útil. Além disso, o maior número equivalente de tanques em série indica que o reator com maior número de voltas se aproxima mais de um PFR ideal. Em etapas posteriores, devem ser desenvolvidas novas simulações contemplando geometrias com maior quantidade de voltas.

Referências

[1] HE, J.; GAO, Y.; LI, J.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; ZHU, M.; ZHANG, J.; CAO, M.; WEI, X.; QU, M. Assemble a removable dual-function solar photothermal evaporator with wetting gradient: Efficient desalination and wastewater treatment. Desalination, v. 599, 118423, 2025. DOI: 10.1016/j.desal.2024.118423.

[2] FERREIRA, M. M.; FIORE, F. A.; SARON, A.; SILVA, G. H. R. da. Systematic review of the last 20 years of research on decentralized domestic wastewater treatment in Brazil: state of the art and potentials. Water Science and Technology, v. 84, n. 12, p. 3469–3488, 2021. DOI: 10.2166/wst.2021.487.

[3] IQBAL, M. A.; AKRAM, S.; KHALID, S.; LAL, B.; UL HASSAN, S.; ASHRAF, R.; KEZEMBAYEVA, G.; MUSHTAQ, M.; CHINIBAYEVA, N.; HOSSEINI BANDEGHARAEI, A. Advanced photocatalysis as a viable and sustainable wastewater treatment process: A comprehensive review. Environmental Research, v. 253, 118947, 2024. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118947.

[4] LEMA, M. W. Wastewater crisis in East African cities: challenges and emerging opportunities. Discover Environment, v. 3, 18, 2025. DOI: 10.1007/s44274-025-00206-w.

[5] ARAÚJO, B. A.; SOUZA, J. E. S. de; SARMENTO, K. K. F.; REBOUÇAS, L. D.; MEDEIROS, K. M. de; LIMA, C. A. P. de. Advanced oxidative processes applied in effluents treatment of membranes production: a review. Research, Society and Development, v. 10, n. 4, e27210414253, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i4.14253.

[6] HÜBNER, U.; SPAHR, S.; LUTZ, H.; RÜTING, S.; GERNJAK, W.; WENKI, J. Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. Heliyon, v. 10, e30402, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e30402.

[7] MENG, A.; ZHANG, J.; XU, D.; CHENG, B.; FAN, J. Photocatalytic water purification: recent advances and challenges. Applied Catalysis B: Environmental, 2021.

[8] SACCO, O.; VAIANO, V.; SANNINO, D. Main parameters influencing the design of photocatalytic reactors for wastewater treatment: a mini review. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, v. 95, p. 2608–2618, 2020. DOI: 10.1002/jctb.6488.

[9] RAHMAN, M. A.; et al. Continuous photocatalytic reactor: Critical review on the design and performance. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 10, n. 3, 107746, 2022. [10] Photocatalytic reactors: technological status, opportunities, and challenges for development and industrial upscaling. In: Interface Science and Technology. v. 32, p. 761–790, 2021.

[11] LEVENSPIEL, O. Chemical Reaction Engineering. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

[12] FOGLER, H. S. Elements of Chemical Reaction Engineering. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006.

[13] DANCKWERTS, P. V. Continuous flow systems: distribution of residence times. Chemical Engineering Science, v. 2, n. 1, p. 1–13, 1953.

[14] RANADE, V. V. Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering. San Diego: Academic Press, 2002.

[15] NAUMOV, V. A.; et al. Residence time distribution in continuous reactors: modeling and experimental analysis. Chemical Engineering Research and Design.

[16] VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2. ed. Harlow: Pearson, 2007.

[17] FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. Computational Methods for Fluid Dynamics. 3. ed. Berlin: Springer, 2002.

[18] MEHROTRA, K.; CURRAN, J. A.; LAWLER, D. F. Some aspects of photocatalytic reactor modeling using computational fluid dynamics. Chemical Engineering Science, v. 101, p. 764–784, 2013. DOI: 10.1016/j.ces.2013.06.035.

[19] BARBOSA, G. et al. Radiation Models for Computational Fluid Dynamics Simulations of Photocatalytic Reactors. Chemical Engineering & Technology, 2023. DOI: 10.1002/ceat.202200551.

[20] Computer Simulations of Photocatalytic Reactors. Catalysts, v. 11, n. 2, 198, 2021.

Anexos

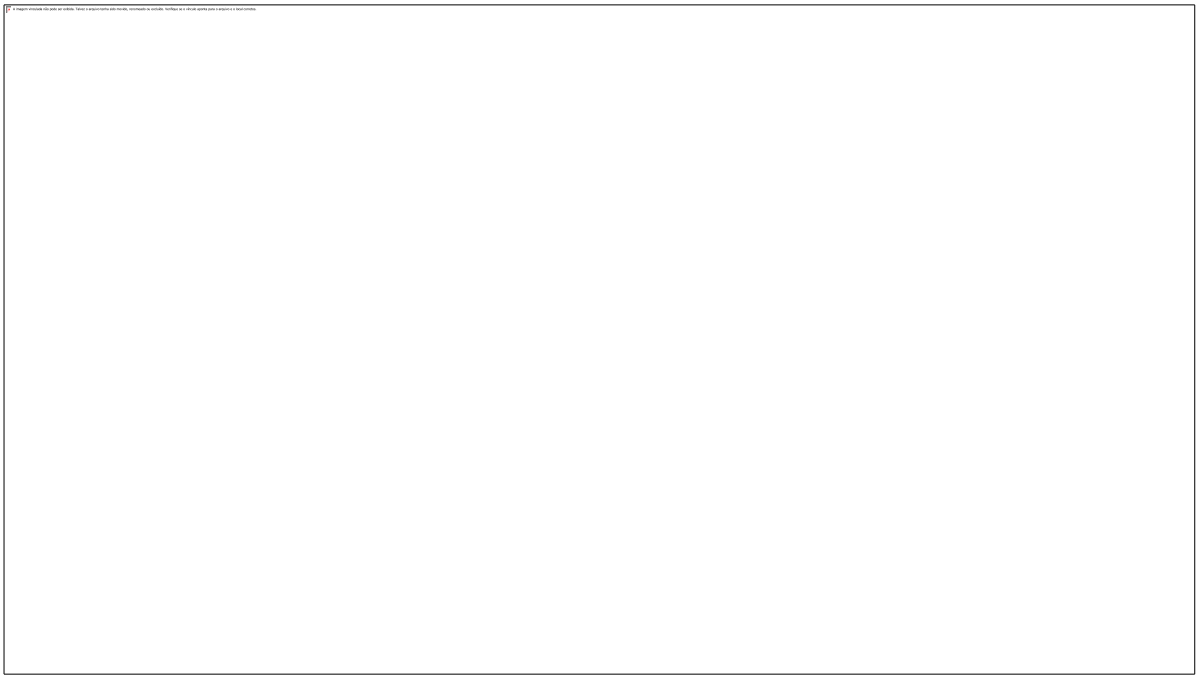


Figura 1. Modelo bidimensional (2D) da geometria do reator com 3 voltas.



Figura 2. Modelo tridimensional (3D) do reator com 3 voltas.

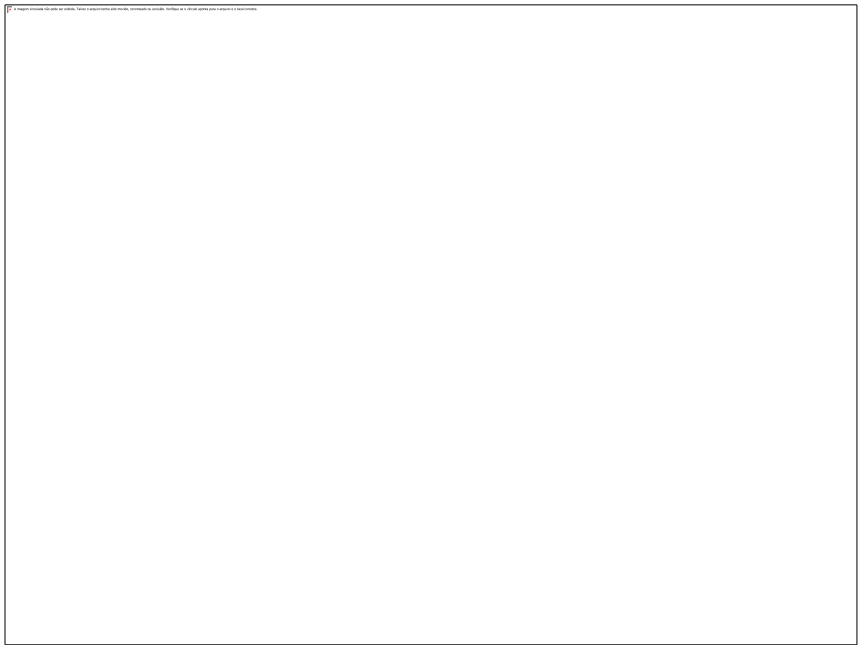


Tabela 1. Características da malha para os reatores 1 e 2.

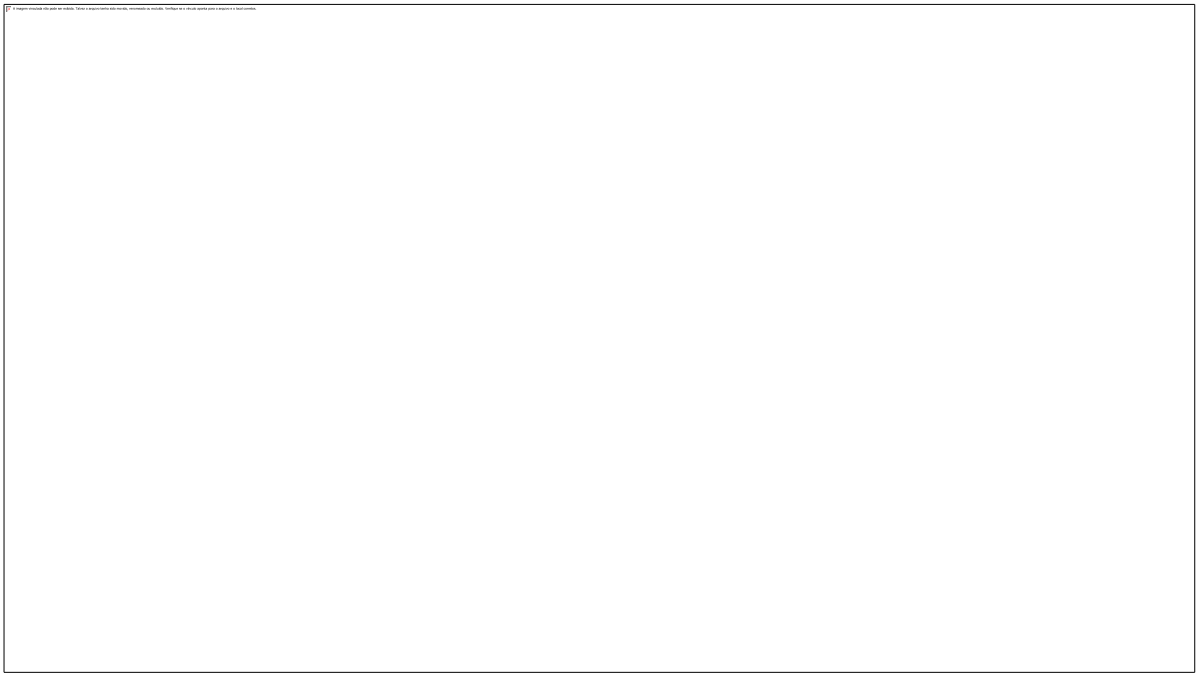
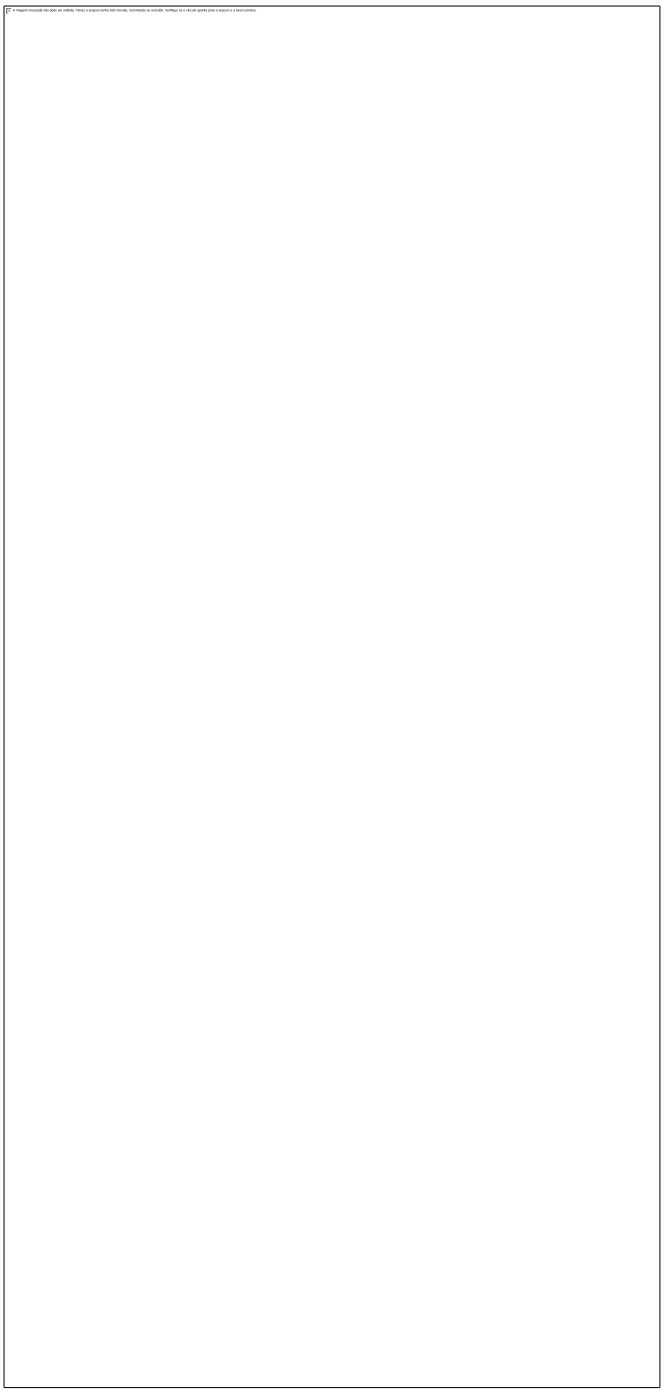


Figura 3. Vista superior da malha do reator 1.



Figura 4. Vista superior da malha do reator 2.



equações

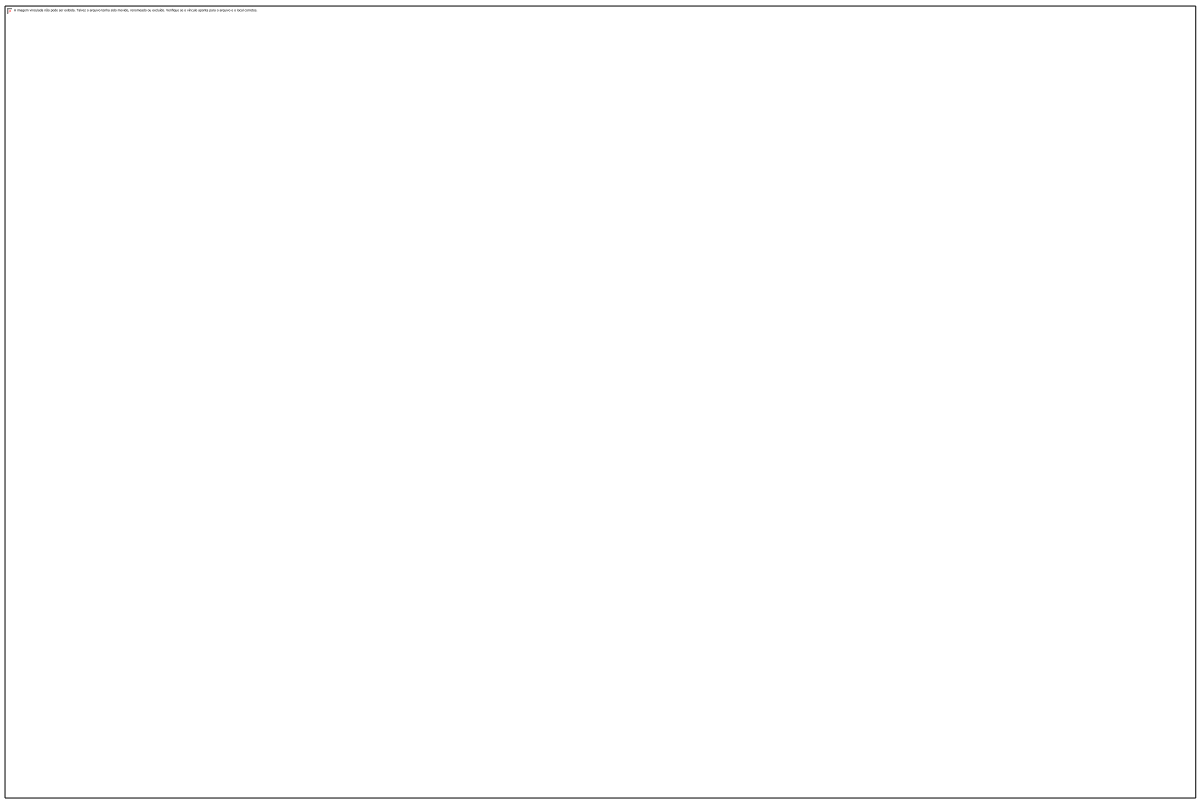


Figura 5. Curvas da função distribuição do tempo de residência E(t) para o Reator 1 sob diferentes velocidades de escoamento.



Figura 6. Curvas da função distribuição do tempo de residência E(t) para o Reator 2 sob diferentes velocidades de escoamento.

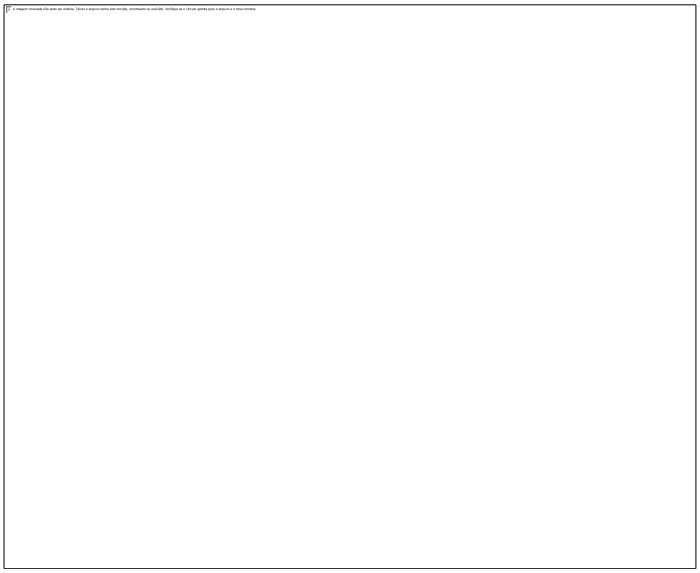


Tabela 2. Parâmetros hidrodinâmicos calculados para o Reator 1 em função do número de Reynolds.

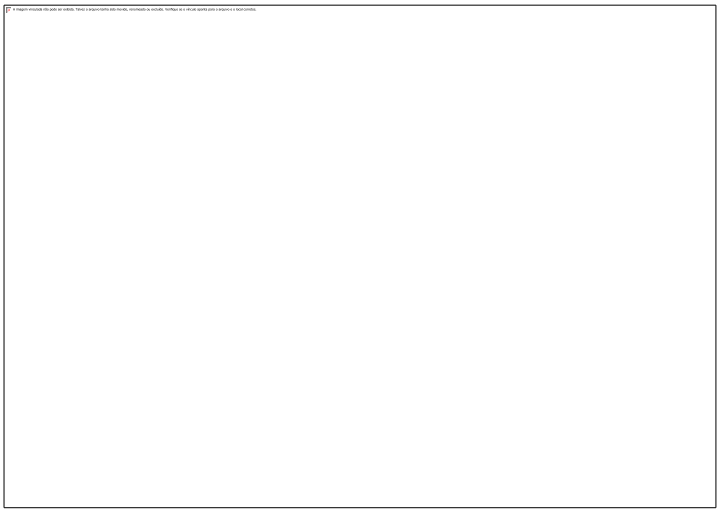


Tabela 3. Parâmetros hidrodinâmicos calculados para o Reator 2 em função do número de Reynolds.

CÓDIGO: ET0478

AUTOR: SOPHIA MARTINS PEREIRA

COAUTOR: DANILO CARLOS DE SOUZA

COAUTOR: FRANCISCO PAULINO DA SILVA

COAUTOR: THYRONE BARBOSA DOMINGOS

COAUTOR: PAULA FABIANE PINHEIRO DO NASCIMENTO

ORIENTADOR: EDUARDO LINS DE BARROS NETO

TÍTULO: CONVERSÃO TERMOCATALÍTICA DE RESÍDUO CARBONÁCEO E ÓLEO DE MOTOR USADO PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Resumo

A crescente demanda por fontes energéticas sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de rotas alternativas para a produção de biocombustíveis a partir de resíduos lignocelulósicos e materiais carbonáceos. Este trabalho investigou a produção de biocombustíveis por conversão termoquímica em meio aquoso, utilizando carvão derivado da pirólise do capim-elefante, óleo de motor usado e catalisador. A reação foi conduzida em reator em batelada, sob atmosfera inerte, com controle de temperatura e pressão. O aumento da temperatura favoreceu a degradação térmica dos compostos presentes nas matérias-primas. Um sistema de resfriamento foi utilizado para coleta e condensação dos produtos, posteriormente caracterizados por GC-MS. Os resultados indicaram a formação de hidrocarbonetos na faixa de C9–C32, incluindo compostos de interesse para combustíveis líquidos, como diesel e biocombustível de aviação. Observou-se redução de compostos oxigenados e aumento do poder calorífico do bio-óleo. Os gases não condensáveis apresentaram predominância de H_2 e CO, indicando potencial para gás de síntese. O resíduo sólido apresentou características adequadas para aproveitamento como adsorvente. As variáveis operacionais influenciaram a distribuição dos produtos, destacando-se temperatura e catalisador na seletividade. O estudo demonstra o potencial da conversão termoquímica de resíduos para produção sustentável de biocombustíveis.

Palavras-chave: Hidrocarbonetos renováveis, biocombustíveis, valorização de resíduos.

TITLE: THERMOCATALYTIC CONVERSION OF CARBONACEOUS RESIDUE AND USED MOTOR OIL FOR BIOFUEL PRODUCTION

Abstract

The growing demand for sustainable energy sources has driven the development of alternative routes for the production of biofuels from lignocellulosic residues and carbonaceous materials. This study investigated biofuel production through thermochemical conversion in an aqueous medium, using charcoal derived from elephant grass pyrolysis, used motor oil, and a catalyst. The reaction was conducted in a batch reactor under an inert atmosphere, with controlled temperature and pressure. Increasing the temperature favored the thermal degradation of compounds present in the feedstocks. A cooling system was used to collect and condense the products, which were subsequently characterized by GC-MS. The results indicated the formation of hydrocarbons in the C9–C32 range, including compounds of interest for liquid fuels, such as diesel and aviation biofuel. A reduction in oxygenated compounds and an increase in the calorific value of the bio-oil were observed. The non-condensable gases were predominantly composed of H_2 and CO, indicating potential for syngas production. The solid residue showed suitable characteristics for use as an adsorbent. The operating variables influenced the product distribution, with temperature and catalyst standing out as key factors affecting selectivity. The study demonstrates the potential of thermochemical conversion of residues for the sustainable production of biofuels.

Keywords: Renewable hydrocarbons, biofuels, waste valorization.

Introdução

A crescente demanda por combustíveis de baixa intensidade de carbono tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de converter biomassas e/ou resíduos lignocelulósicos em biocombustíveis avançados. Entre as diferentes rotas de conversão, os processos termoquímicos em meio aquoso têm despertado interesse por permitirem a transformação de matérias-primas sólidas de baixo valor agregado em compostos com elevado potencial energético, reduzindo simultaneamente impactos ambientais associados ao descarte desses resíduos [1].

Os carvões provenientes da conversão termoquímica de biomassas lignocelulósicas têm despertado crescente interesse como matérias-primas para a produção de biocombustíveis avançados, em virtude de suas propriedades físico-químicas. Durante a carbonização, ocorre o enriquecimento da fração sólida em carbono fixo, acompanhado pela redução das razões atômicas H/C e O/C e pelo aumento da densidade energética do material. Essas características conferem ao carvão maior estabilidade térmica e menor conteúdo de compostos oxigenados em comparação à biomassa in natura, reduzindo a demanda por etapas de desoxigenação durante sua conversão em combustíveis líquidos. Além disso, sua estrutura porosa e elevada área superficial favorecem a interação entre reagentes e catalisadores, potencializando as reações de conversão termoquímica e a formação de hidrocarbonetos de maior valor agregado [2][3]. Dessa forma, a utilização do carvão como matéria-prima representa uma estratégia promissora para a valorização de

coprodutos da pirólise, contribuindo para o aproveitamento integral da biomassa e para o fortalecimento do conceito de biorrefinaria e economia circular.

Nesse contexto, foi selecionado o carvão obtido da pirólise do capim-elefante (Pennisetum purpureum), uma biomassa de elevada produtividade e ampla disponibilidade, visando avaliar seu

potencial como precursor para a obtenção de biocombustíveis renováveis por meio da conversão termoquímica. A escolha desse material fundamenta-se tanto em suas características energéticas quanto na possibilidade de agregar valor a um coproduto frequentemente destinado a aplicações de menor valor econômico, ampliando o aproveitamento da cadeia produtiva da biomassa. A segunda matéria prima para realização da conversão, foi o óleo de motor usado. De acordo com a literatura [4][5], sua presença na reação pode melhorar a qualidade e o rendimento do biocombustível, além de reduzir a formação de compostos oxigenados. Desta forma, o presente estudo aborda a valorização simultânea de dois resíduos (carvão da pirólise e o óleo de motor usado), contribuindo para a economia circular e para a redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado destes resíduos.

Metodologia

A conversão termoquímica do carvão da pirólise de capim-elefante (CCE) foi realizada em um reator batelada (100 mL) equipado com sistema de controle de temperatura, pressão e agitação mecânica. A carga reacional (CCE, óleo de motor usado e catalisador) foi introduzida no reator e submetida às condições operacionais previamente estabelecidas para promover a conversão da biomassa (CCE). Durante todo o processo, a temperatura, a pressão e a agitação foram monitoradas e controladas para garantir a reprodutibilidade da reação. Foram realizados quatro ensaios, variando a massa do CCE (10g, 15g, 25g e 30g), mantendo-se constante o volume do óleo de motor usado, a temperatura, pressão e quantidade de catalisador.

Ao término de cada ensaio, a fração gasosa condensável foi resfriada, permitindo a condensação do biocombustível, que foi posteriormente coletado para análise. O biocombustível obtido foi caracterizado por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), possibilitando a identificação qualitativa dos compostos presentes e a faixa de hidrocarbonetos. O ajuste adequado das condições operacionais empregadas neste estudo, resultou na produção de um biocombustível compatível com diesel, sem necessidade de etapas de refinamento. Por essa razão, as condições operacionais do processo não são apresentadas neste trabalho em razão da possibilidade de proteção da tecnologia por meio de depósito de patente.

Figura 1 - Figura esquemática do processo termoquímico para a obtenção de biocombustível.

Resultados e Discussões

Os quatro experimentos realizados permitiram avaliar a influência da quantidade do carvão da pirólise do capim elefante empregada na reação sobre a produção e as características do biocombustível obtido. Foram realizadas quatro bateladas, utilizando 10, 15, 25 e 30 g de biomassa, mantendo-se o volume de óleo de motor usado. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados obtidos nas diferentes condições experimentais.

Verificou-se aumento do volume de biocombustível produzido com a elevação da carga de biomassa. A condição com 10 g apresentou 61,0 mL de produto, enquanto a maior produção, de 87,5 mL, foi obtida com 30 g. Esse comportamento indica que, dentro da faixa avaliada, o aumento da quantidade de biomassa favoreceu a formação da fração líquida.

Apesar da maior produção, a condição de 30 g apresentou uma limitação operacional. Durante o início da reação, a mistura adquiriu consistência bastante pastosa, dificultando a homogeneização. Esse comportamento indica que essa carga se aproxima do limite de biomassa que pode ser incorporado ao óleo de motor usado sem comprometer as condições de mistura do sistema.

A densidade das amostras de biocombustível produzido em cada ensaio variou entre 0,7946 e 0,8289 g/mL, valores que se encontram na faixa característica de biocombustíveis de aviação (SAF), conforme ASTM D1655 [6], além de serem próximos aos valores observados para biocombustíveis da faixa do diesel (Resolução ANP nº 968/2024) [7]. Esse resultado indica que o produto apresenta propriedades físicas compatíveis com combustíveis líquidos convencionais, embora a avaliação de sua adequação como SAF ou combustível diesel exija a análise conjunta de outros parâmetros de qualidade.

Visualmente, foram observadas diferenças na coloração do biocombustível obtido em relação a quantidade da biomassa (Figura 2). Na reação com 25 g de biomassa, o bio-óleo apresentou aspecto mais transparente e tonalidade esverdeada. Já a condição de 10 g produziu uma amostra de coloração alaranjada escura. Essa alteração pode estar diretamente relacionada à quantidade e à natureza dos compostos extraídos/formados durante a conversão termocatalítica. A modificação da relação biomassa/óleo de motor usado influenciou nas reações paralelas que ocorrem durante a conversão, afetando nos compostos formados (compostos oxigenados e aromáticos).

Figura 2 - Amostras de biocombustível de cada batelada.

A caracterização foi necessária para estabelecer a relação entre a coloração e a composição química do biocombustível. A análise por GC-MS revelou a presença de hidrocarbonetos em diferentes faixas de carbono entre as bateladas (Tabela 2). Na segunda batelada as amostras 01 e 02 apresentaram faixas de C9–C20 e C9–C32, respectivamente. Nas demais condições, foram identificadas faixas de C9–C16 para 10 g, C9–C17 para 25 g de biomassa, e C9–C17 para 30 g.

Esses resultados indicam a formação de hidrocarbonetos com diferentes massas moleculares, abrangendo compostos de interesse para a produção de biocombustíveis líquidos. Na segunda batelada, a amostra 1 apresentou densidade de 0,7946 g/mL, valor próximo às faixas de densidade da biogasolina e o BioQAV/SAF.

A distribuição dos hidrocarbonetos também variou entre as condições experimentais (Tabela 2). A maior área relativa de hidrocarbonetos identificados foi observada na batelada de 25 g, com 74,84%, enquanto as condições de 10 e 30 g apresentaram 60,91% e 62,50%, respectivamente. Assim, a condição de 25 g apresentou maior proporção relativa de hidrocarbonetos, enquanto a condição de 30 g proporcionou o maior volume de bio-óleo, de 87,5 mL.

Dessa forma, os resultados demonstram que o aumento da quantidade de biomassa não apresentou relação direta com a proporção de hidrocarbonetos identificados. A condição intermediária de 25 g apresentou o maior percentual relativo de hidrocarbonetos, enquanto 30 g resultou no maior volume de produto líquido.

Tabela 2 - Área de hidrocarbonetos de cada amostra e suas faixas de carbono.

Além da fração líquida, ao final das reações foi obtido um resíduo sólido carbonáceo (biochar) retido no reator. Esse material apresenta potencial para aproveitamento como bioadsorvente, agregando valor ao resíduo gerado no processo e contribuindo para o aproveitamento integral da biomassa. A utilização do biochar como bioadsorvente também está relacionada à sua estrutura porosa e à possibilidade de aplicação na remoção de diferentes contaminantes. Dessa forma, o processo apresenta potencial para gerar não apenas uma fração líquida de interesse energético, mas também um coproduto sólido com possível aplicação ambiental.

Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram o potencial da conversão termoquímica do carvão proveniente da pirólise do capim-elefante, em conjunto com óleo de motor usado, para a produção de uma fração líquida com características físico-químicas compatíveis com combustíveis das faixas de aviação e diesel, sem a necessidade de etapas adicionais de refino. A variação da razão biomassa/óleo de motor usado permitiu avaliar a influência da quantidade da biomassa em relação às características do produto líquido.

Entre as condições avaliadas, a utilização de 30 g de biomassa proporcionou o maior volume de bio-óleo, correspondente a 87,5 mL. Entretanto, a condição com 25 g apresentou a maior área relativa de hidrocarbonetos, com 74,84%, demonstrando que o aumento da quantidade de biomassa não resulta necessariamente em maior proporção de compostos hidrocarbônicos. A análise por GC-MS também confirmou a formação de hidrocarbonetos em diferentes faixas de carbono, variando de C9–C16 a C9–C32,

dependendo da condição experimental, indicando a formação de compostos com potencial de aplicação na produção de biocombustíveis líquidos como o SAF e o diesel.

Além da obtenção da fração líquida, a formação de um resíduo sólido carbonáceo ao final do processo evidencia a possibilidade de aproveitamento de um segundo produto. O biochar apresentou potencial para utilização como material adsorvente, possibilitando uma aplicação adicional ao resíduo e contribuindo para o aproveitamento mais completo da matéria-prima.

A conversão termocatalítica do carvão da pirólise de capim-elefante utilizando óleo de motor usado, após o ajuste das condições operacionais, possibilitou a obtenção de uma fração líquida com características físico-químicas compatíveis com combustíveis das faixas de aviação e diesel, sem a necessidade de etapas adicionais de refino. Esse resultado constitui um diferencial da rota proposta, associado à valorização simultânea de resíduos e ao aproveitamento potencial dos coprodutos gerados, contribuindo para uma abordagem integrada de aproveitamento de resíduos, economia circular e produção de combustíveis de maior valor agregado.

Referências

[1] GIMŽAUSKAITĖ, Dovilė; EIMONTAS, Justas. Thermochemical conversion of biomass for sustainable biofuel production: a review of technologies, performance parameters, and future prospects. Applied Sciences, v. 16, n. 13, p. 6382, 2026. DOI: 10.3390/app16136382.

[2] KANG, Kang; NANDA, Sonil; HU, Yulin. Current trends in biochar application for catalytic conversion of biomass to biofuels. Catalysis Today, v. 404, p. 3–18, 2022. DOI: 10.1016/j.cattod.2022.06.033.

[3] YAASHIKAA, P. R.; PRACHETHAN KUMAR, P.; VARJANI, Sunita; SARAVANAN, Anbalagan. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. Biotechnology Reports, v. 28, e00570, 2020. DOI: 10.1016/j.btre.2020.e00570.

[4] ARDILA-SUAREZ, Carolina; VILLEGAS, Juan Pablo; LINS DE BARROS NETO, Eduardo; GHISLAIN, Thierry; LAVOIE, Jean-Michel. Waste surgical masks to fuels via thermochemical co-processing with waste motor oil and biomass. Bioresource Technology, v. 348, p. 126798, 2022. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.126798.

[5] ARDILA-SUAREZ, Carolina; VILLEGAS, Juan Pablo; LINS DE BARROS NETO, Eduardo; GHISLAIN, Thierry; LAVOIE, Jean-Michel. Bee green: Renewable hydrocarbon fuels from honeycomb residues. Fuel, v. 340, p. 127319, 2023. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127319.

[6] ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1655-24: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024. A especificação apresenta densidade a 15 °C de 775–840 kg/m³ para Jet A e Jet A-1.

[7] BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução ANP nº 968, de 30 de abril de 2024. Estabelece as especificações dos óleos diesel destinados a veículos ou equipamentos dotados de motores do ciclo Diesel e as obrigações quanto ao controle da qualidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 maio 2024.

Anexos

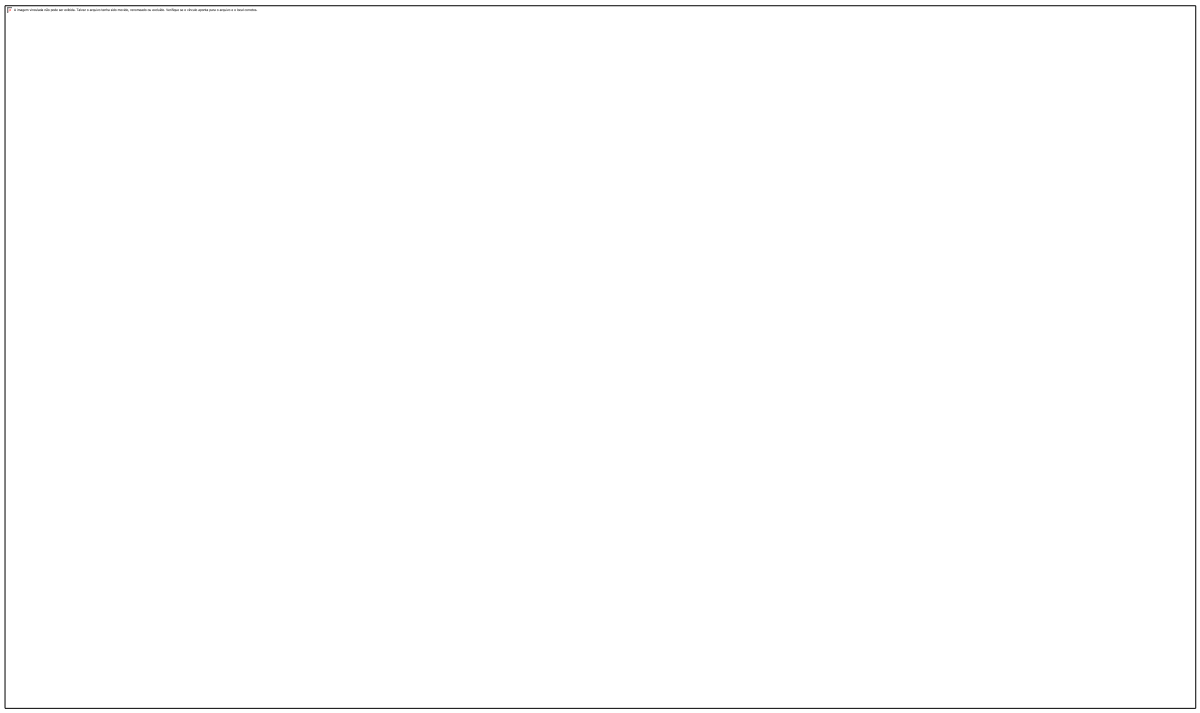


Figura 1 - Figura esquemática do processo termoquímico para a obtenção de biocombustível.



Tabela 1 – Resultados obtidos nas diferentes condições experimentais.

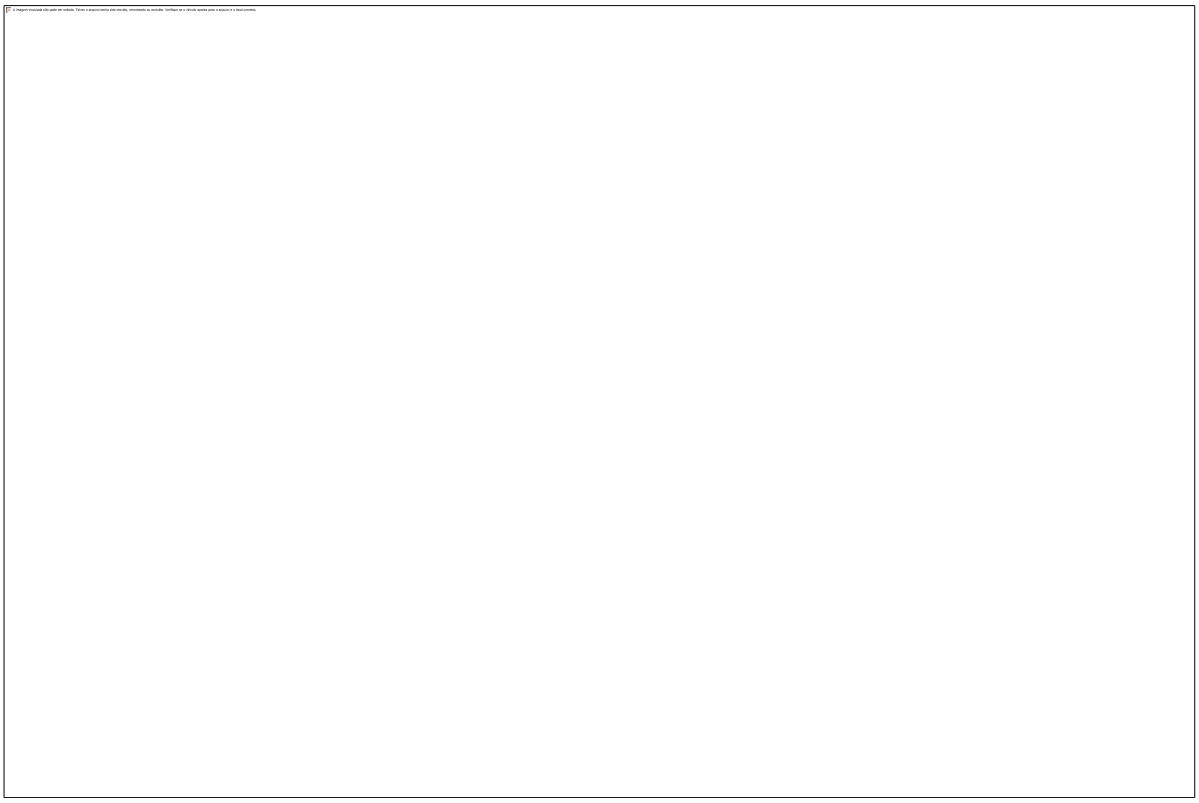


Figura 2 - Amostras de biocombustível de cada batelada.



Tabela 2 - Área de hidrocarbonetos de cada amostra e suas faixas de carbono.

CÓDIGO: ET0491

AUTOR: THAYS PRISCILA MACIEL PEGADO

ORIENTADOR: IRIS OLIVEIRA DA SILVA

TÍTULO: Extração e caracterização de algas para produção de fibras e corantes têxteis

Resumo

Esta revisão integrativa, baseada em 19 artigos, investigou o papel das algas (26,32%) em comparação com fontes terrestres (73,68%) na transição sustentável da indústria têxtil. A macroalga Sargassum filipendula destacou-se na biorrefinaria, onde Solventes Eutéticos Profundos (DES) permitiram a extração de 110,64 mg PGE/g de florotaninos e pigmentos antioxidantes (Mello et al., 2025b). Já a microalga Chlorella vulgaris demonstrou eficiência na remediação do corante azo Direct Green 6, com biosorção de 126,0 mg/g e degradação enzimática via azoredutase, lacase e peroxidases, além de atuar como biocorante natural em tecidos (Moradi et al., 2024b; Textile Grade Long Natural Cellulose Fibers from Bark Cotton, n.d.). Compósitos de alginato com lacase alcançaram remoção de 74% do azul de metileno e 69% do violeta de cristal, mantendo atividade após múltiplos ciclos (Nouaa et al., 2025b).

Entre as fontes terrestres, Nymphaea rubra apresentou fibras sem lúmen e resistência de 90,91 MPa (Imtiazh & Uddin, 2025b); Musa acuminata forneceu celulose mercerizada de 768 MPa sob KOH (Sango et al., 2018b); e Morus alba atingiu 92,60% de pureza de celulose (Liu et al., 2011b). Outras inovações incluíram carvão microporoso de cânhamo (BET: 2.192 m²/g) (Vukcevic et al., 2012b), tingimento por chá (Ren et al., 2019b) e tecidos funcionais com quitosana/casca de castanha e UPF > 40 (Fabrication of Bio-Based Coloristic, n.d.-b).

Palavras-chave: Ecoeficiência; Recursos marinhos; Algas marinhas; Microalgas; Biomassa

TITLE: Extraction and Characterization of Algae for Textile Fiber and Dye Production

Abstract

This integrative review, based on 19 articles, evaluated the potential of algae (26.32%) compared to terrestrial sources (73.68%) to promote the sustainable transition of the textile industry. The brown macroalga Sargassum filipendula stood out in biorefinery, where Deep Eutectic Solvents (DES) enabled the extraction of 110.64 mg PGE/g of phlorotannins and antioxidant pigments (Mello et al., 2025b). In the remediation of the azo dye Direct Green 6, Chlorella vulgaris showed biosorption of 126.0 mg/g and enzymatic degradation by azoreductase, laccase, and peroxidases, in addition to acting as a natural biodye in fabrics (Moradi et al., 2024b; Textile Grade Long Natural Cellulose Fibers from Bark Cotton, n.d.). Alginate composites with laccase removed 74% of methylene blue and 69% of crystal violet, maintaining activity after 10 cycles (Nouaa et al., 2025b).

Among terrestrial sources, Nymphaea rubra presented lumen-free fibers with tensile strength of 90.91 MPa (Imtiazh & Uddin, 2025b); Musa acuminata provided mercerized cellulose of 768 MPa under KOH (Sango et al., 2018b); and Morus alba reached 92.60% cellulose purity (Liu et al., 2011b). Other innovations included microporous hemp charcoal (BET: 2,192 m²/g) (Vukcevic et al., 2012b), tea-based dyeing (Ren et al., 2019b), and functional fabrics with chitosan/chestnut shell and UPF > 40 (Fabrication of Bio-Based Coloristic, n.d.-b).

Keywords: Eco-efficiency; Marine resources; Seaweed; Microalgae; Biomass

Introdução

A indústria têxtil global enfrenta uma grave crise de sustentabilidade, marcada pelo acúmulo de resíduos plásticos oriundos de polímeros sintéticos petroquímicos e pelo rápido esgotamento de recursos não renováveis (Liu et al., 2011). Esse modelo linear de produção intensifica a pegada de carbono e gera volumes críticos de resíduos em aterros sanitários (Liu et al., 2011; Lo Re et al., 2023). Além disso, o descarte inadequado de efluentes compromete ecossistemas aquáticos e a saúde humana (Nouaa et al., 2025a). Estima-se que 70% dos corantes industriais sejam do tipo azo, altamente recalcitrantes e associados à liberação de aminas aromáticas carcinogênicas e tóxicas durante sua degradação (Agrawal & Chopra, 2020a; Moradi et al., 2024a). O processo convencional de tingimento de tecidos celulósicos, dependente de mordentes químicos e sais metálicos, agrava esse cenário ao gerar resíduos líquidos de difícil tratamento e riscos ocupacionais (Agrawal & Chopra, 2020a; Ren et al., 2019a).
Diante desse gargalo ecológico, cresce a busca por materiais biodegradáveis e renováveis capazes de substituir insumos derivados do petróleo (Liu et al., 2011a). Entre as rotas promissoras, destacam-se a valorização da biomassa de algas marinhas e o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos para fibras e biocorantes funcionais (Moradi et al., 2024a). As algas marinhas surgem como plataforma multifuncional para sustentabilidade industrial. Chlorella vulgaris, por exemplo, atua na ficorremediação de efluentes contaminados, degradando corantes azo como o Direct Green 6 via azoredutase, lacase e peroxidases, convertendo-os em metabólitos assimiláveis (Moradi et al., 2024a). Já a biomassa residual de Sargassum filipendula, frequentemente descartada, pode ser valorizada em biorrefinarias com solventes eutéticos profundos

(DES), extraindo florotaninos e pigmentos antioxidantes aplicáveis às indústrias cosmética e farmacêutica (Mello et al., 2025a). O alginato dessas macroalgas, combinado a nanopartículas como LDH de MgFe, forma compósitos que imobilizam lacase de Trametes versicolor, alcançando degradação de 74% de azul de metileno e 69% de violeta de cristal em 5 horas, mantendo 70% da atividade após 10 ciclos (Nouaa et al., 2025a).

Além da remediação, a biomassa microalgal oferece pigmentos ecológicos. Chlorella vulgaris aplicada como corante natural em algodão, sob condições brandas de tingimento (55 °C, pH 8,4, 1h), confere tonalidade verde-clara sem mordentes sintéticos, com solidez à luz comparável a corantes naturais (Using Chlorella Vulgaris as a Natural-Textile Dye, n.d.-a).

Complementando o potencial das algas, fibras celulósicas de plantas aquáticas e resíduos agrícolas vêm sendo exploradas. O pedúnculo de Nymphaea rubra fornece fibras sem lúmen, resistentes (90,91 MPa) e termicamente estáveis (231 °C), favorecendo ecocompósitos e têxteis funcionais (Imtiazh & Uddin, 2025a). Resíduos como pseudocaules de Musa acuminata (Sango et al., 2018a) e cascas de Morus alba (Liu et al., 2011a) geram celulose purificada e estável. Tratamentos alcalinos em fibras de cânhamo induzem transformações benéficas de celulose I para II (Vukcevic et al., 2012a). Em nível avançado, a modificação química em dialcool celulose confere propriedades termoplásticas, permitindo processamento por extrusão e injeção, abrindo caminho para substituir plásticos petroquímicos (Lo Re et al., 2023).

Na vertente da coloração sustentável, resíduos florestais e agrícolas também são aplicados. Pigmentos de folhas de chá, ricos em catequinas, e extratos de folhas de teca descartadas, ricos em taninos e quinonas como a tectoleafquinona, conferem colorações sólidas e propriedades antibacterianas a tecidos de algodão, lã e seda, eliminando riscos ambientais dos processos convencionais (Agrawal & Chopra, 2020a; Ren et al., 2019a).

Metodologia

A metodologia desta revisão integrativa foi delineada a partir da formulação de perguntas norteadoras utilizando o método PICO (Problema, Intervenção, Comparação e Resultados). O problema definido foi: quais são os desafios ambientais e tecnológicos da indústria têxtil relacionados ao uso de fibras convencionais e corantes sintéticos, e como isso impulsiona a busca por alternativas sustentáveis? Como intervenção, considerou-se o uso de algas marinhas e biopolímeros algais como fontes de fibras e corantes naturais aplicados em processos têxteis. O contexto de comparação envolveu outras fontes renováveis já estudadas, como fibras vegetais (algodão, cânhamo, banana, resíduos agroindustriais) e corantes naturais de plantas, frutas e resíduos alimentares, destacando semelhanças e diferenças em propriedades e aplicações. Por fim, os resultados buscados foram identificar as propriedades funcionais, inovações tecnológicas e benefícios ambientais das fibras e corantes derivados de algas marinhas em relação às alternativas sustentáveis já existentes na indústria têxtil.

A estratégia de busca foi construída com operadores booleanos, aplicados em bases de dados para combinar ou excluir termos. O operador OR foi utilizado para ampliar a busca incluindo sinônimos ou termos relacionados, enquanto o operador AND restringiu os resultados, exigindo que todos os termos aparecessem em conjunto. Além disso,

empregou-se o campo TITLE-ABS-KEY, que limita a pesquisa ao título, resumo e palavras-chave dos artigos. Foram utilizadas palavras-chave relacionadas a recursos renováveis, algas marinhas, fibras, corantes e aplicações na indústria têxtil, combinadas entre si para garantir que os artigos selecionados abordassem simultaneamente esses aspectos.

A pesquisa inicial foi realizada na base Scopus, que retornou 476 resultados, e na PubMed, que apresentou 10 registros. Na Scopus, aplicaram-se filtros para restringir a busca a artigos científicos publicados em inglês, excluindo revisões, o que resultou em 17 artigos compatíveis com os critérios estabelecidos pelo PICO. Da PubMed, apenas 1 artigo foi selecionado. Adicionalmente, foi incluído 1 artigo encontrado de forma avulsa no Google Scholar, totalizando 19 artigos que compuseram o corpus da revisão.

A triagem dos artigos foi conduzida em planilha no Excel, com filtros sucessivos. Primeiramente, analisaram-se títulos e resumos para verificar a compatibilidade com os parâmetros definidos pelo PICO. Os artigos considerados pertinentes avançaram para o filtro de recuperação, no qual se conferiu a disponibilidade dos arquivos em PDF para leitura integral. Em seguida, realizou-se a etapa de leitura completa, resultando na seleção final dos 19 artigos que compõem esta revisão integrativa.

Para garantir transparência e rigor metodológico, todo o processo de triagem e seleção foi representado graficamente por meio do fluxograma PRISMA, que detalha as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos. Esse recurso permitiu visualizar de forma sistemática o percurso da pesquisa, desde a busca inicial até a composição final do corpus analisado.

Resultados e Discussões

O Eixo Tecnológico das Algas Marinhas: Macroalgas, Microalgas e Derivados

As algas marinhas consolidam-se nesta pesquisa como uma plataforma multifuncional para a sustentabilidade têxtil, abrangendo desde a extração de bioativos até a remediação de efluentes e a criação de fibras inteligentes. No âmbito da valorização de biomassas residuais, a macroalga parda Sargassum filipendula demonstrou ser uma fonte subutilizada de alta relevância, visto que cerca de 75% de sua biomassa é descartada após a extração industrial de alginato (Mello et al., 2025b). A caracterização desse resíduo revelou teores de 7,36% de proteínas, 1,11% de lipídios, 20,51% de cinzas e 50,25% de fibras totais, com uma presença residual de alginato de sódio de 5,89% (Mello et al., 2025b). A extração otimizada com Solventes Eutéticos Profundos (DES) permitiu recuperar até 110,64 mg PGE/g de florotaninos e 78,15 mg GAE/g de fenólicos totais a 120 °C, além de pigmentos como clorofila total (21,61 µg/g) e feofitina total (38,11 µg/g) Tais extratos apresentaram expressiva capacidade antioxidante, atingindo valores de 24,42 mg TE/mL no ensaio ABTS e 2,26 mg TE/mL no ensaio FRAP (Mello et al., 2025b) .

Quanto à remediação hídrica, o uso de células vivas da microalga Chlorella vulgaris permitiu a biodegradação ativa do corante azo Direct Green 6 (DG6). A eficiência de remoção foi máxima em pH 8,0 devido ao crescimento celular ótimo, embora a biosorção por grama de peso seco tenha sido favorecida em pH ácido (5,0 a 6,5) Sob estresse de 60 mg/L de corante, a microalga exibiu uma resposta de hormese, aumentando os teores de clorofila a em 353% e clorofila b em 730% para compensar a

redução da luz disponível para a fotossíntese(Moradi et al., 2024b). O mecanismo enzimático envolveu a ação da azoredutase na quebra das ligações azo, seguida por lacases e peroxidases que degradaram intermediários tóxicos em ácidos carboxílicos lineares. Além da remediação, a Chlorella vulgaris foi validada como um biocorante têxtil natural Extraído por Soxhlet com acetona, o pigmento algal coloriu tecidos de algodão sob condições de 55 °C e pH 8,4, dispensando mordentes metálicos e alcançando solidez à luz de grau (Moradi et al., 2024b).

O aproveitamento dos derivados estruturais das algas foi evidenciado no desenvolvimento de compósitos de alginato para o tratamento de águas. A imobilização da enzima lacase em esferas de compósito de alginato e hidróxido duplo lamelar (LDH) de MgFe resultou em taxas de descoloração de 74% para o Azul de Metileno e 69% para o Violeta de Cristal em 5 horas. O biocatalisador manteve mais de 70% de sua atividade após 10 ciclos de uso (Nouaa et al., 2025b) .
Complementarmente, a síntese de fibras de algas termorreguladoras por fiação úmida (wet spinning) integrou microcápsulas magnéticas de parafina@$CaCO_3$/Fe_3O_4 à matriz de alginato de sódio. Essas fibras apresentaram uma entalpia de fusão de 19,8 J/g e estabilidade térmica inicial de 120 °C, conferindo propriedades de armazenamento térmico para tecidos funcionais (Preparação e Propriedades de Fibras de Algas, n.d.).

Análise Comparativa com Outras Fontes Terrestres e Aquáticas

Ao comparar o núcleo de algas marinhas com as outras 14 fontes analisadas, observam-se distinções tecnológicas significativas no isolamento de fibras celulósicas e na química de tingimento (Liu et al., 2011b).
Diversidade de Fibras Celulósicas: Enquanto as fibras de algas são frequentemente regeneradas de polissacarídeos, as fontes terrestres e a planta aquática Nymphaea Rubra (lírio d'água) oferecem fibras de alta resistência mecânica extraídas diretamente de tecidos vegetais. As fibras de lírio d'água apresentam uma morfologia única sem lúmen (cavidade oca), o que proporciona resistência à tração de 90,91 MPa e estabilidade térmica até 231,1 °C (Imtiazh & Uddin, 2025b) em comparação, fibras de casca de amoreira (Morus alba L.) alcançaram pureza de 92,60% de celulose e estabilidade térmica superior de 355 °C (Liu et al., 2011b) A deconstrução do pseudocaule da bananeira (Musa acuminata) permitiu a obtenção de fibras com módulo de Young de até 26 GPa e a transição polimórfica de Celulose I para Celulose II sob tratamento alcalino severo (Sango et al., 2018b) . Fibras de palha de soja e hastes de algodão também foram refinadas, apresentando altos teores de celulose (85% e 82,1%, respectivamente) e finura adequada para processos de fiação têxtil. Em uma abordagem de reciclagem, nanofibras de resíduo de lodo de papel foram dissolvidas em líquidos iônicos para produzir filamentos de celulose regenerada competitivos com a viscose comercial (Natural Cellulose Fibers from Soybean Straw, n.d.) .
Avanços em Engenharia de Materiais: Para além das fibras marinhas inteligentes, as fontes terrestres permitiram o desenvolvimento de celulose termoprocessável através da modificação química em dialcool celulose, viabilizando o processamento por fusão (extrusão e injeção) (Continuous and Sustainable Cellulose Filaments, n.d.) . Adicionalmente, fibras de cânhamo carbonizadas e ativadas com KOH geraram um carvão microporoso com área superficial de 2.192 m^2/g, superando as capacidades de adsorção passiva de poluentes de muitos materiais biológicos (Vukcevic et al., 2012b).
Estratégias de Coloração e Funcionalização: Diferente da simplicidade do biocorante de microalga, as fontes terrestres exploram mecanismos complexos de fixação .

• Polimerização In-situ: O extrato de chá foi utilizado para colorir algodão através da polimerização de catequinas no interior das fibras oxidadas (Ren et al., 2019b) .
• Coordenação Metálica e UV: A combinação de casca de castanha, rica em polifenóis, com tecidos cationizados por quitosana e mordantamento com ferro, elevou o Fator de Proteção Ultravioleta (UPF) para valores acima de 40 (Fabrication of Bio-Based Coloristic, n.d.-b).
• Corantes Microbianos e Vegetais: O pigmento prodigiosina, de origem bacteriana, conferiu propriedades antibacterianas de até 89,70% contra S. aureus em tecidos mistos. Extratos de folhas de teca (Tectona grandis), contendo tectoleafquinona, e de pimentão vermelho (Capsicum annum L.) foram validados como fontes sustentáveis de cores sólidas e funcionais para lã, seda e nylon. Por fim, biocorantes de Hypericum scabrum demonstraram excelente resistência ao desbotamento artificial por lâmpadas de Xenon (Agrawal & Chopra, 2020b).

Conclusão

A presente revisão integrativa consolidou a complementaridade biotecnológica entre recursos marinhos e biomassas terrestres na transição ecológica da cadeia têxtil. O eixo das algas marinhas (macro, microalgas e derivados) destacou-se como plataforma multifuncional essencial para processos circulares. A biomassa residual de macroalgas pardas, como Sargassum filipendula, demonstrou viabilidade para extração seletiva de florotaninos e pigmentos antioxidantes por Solventes Eutéticos Profundos (DES) (Mello et al., 2025b). Na remediação e coloração têxtil, Chlorella vulgaris atua na ficorremediação e biodegradação enzimática de corantes azo recalcitrantes, mediada por azoredutase, lacase e peroxidases (Moradi et al., 2024b), enquanto sua biomassa seca funciona como biocorante ecológico para algodão (Using Chlorella Vulgaris as a Natural-Textile Dye, n.d.-b).
O biopolímero alginato derivado de macroalgas consolidou-se como matriz ideal para suportes híbridos LDH/alginato, voltados à imobilização estável e reutilizável de enzimas em tratamento de águas residuais (Nouaa et al., 2025b). Em contrapartida, fontes vegetais terrestres e plantas aquáticas não algais evidenciaram papel estrutural insubstituível, fornecendo integridade mecânica superior. Fibras de Nymphaea rubra revelaram morfologia sólida sem lúmen, resistência de 90,91 MPa e estabilidade térmica até 231 °C (Imtiazh & Uddin, 2025b). Resíduos de Musa acuminata e Morus alba forneceram celulose purificada de alta cristalinidade e estabilidade térmica entre 355–357 °C (Liu et al., 2011b; Sango et al., 2018b). Já resíduos de cânhamo carbonizados e ativados com KOH geraram carvão microporoso com área superficial de 2.192 m^2/g para adsorção passiva de poluentes (Vukcevic et al., 2012b).
Os principais desafios para o escalonamento dessas tecnologias incluem o desenvolvimento de sistemas DES de baixo custo, capazes de alcançar taxas de recuperação superiores a 90% (Mello et al., 2025b), e a otimização da uniformidade mecânica de filamentos funcionais na fiação úmida. Superados esses gargalos, a integração sinérgica entre a bioatividade das rotas algais e a robustez das fibras celulósicas terrestres constitui base científica sólida para mitigar impactos ambientais e consolidar uma cadeia têxtil verdadeiramente circular (Mello et al., 2025b; Sango et al., 2018b).

Referências

ADU, C.; ZHU, C.; JOLLY, M. et al. Continuous and sustainable cellulose filaments. Journal of Cleaner Production, v. 280, 124503, 2021.
ALMOULKI, T.; AKKAYA, E. Using chlorella vulgaris as a natural-textile dye. Environmental Research and Technology, v. 6, n. 4, p. 326–331, 2023.
CAO, S.; HOU, X.; SUN, F.; ZHANG, L.; YANG, Y. Textile grade long natural cellulose fibers from bark of cotton stalks using steam explosion as a pretreatment. Cellulose, v. 21, p. 3851–3860, 2014.
CHOPRA, S. et al. Sustainable dyeing of selected natural and synthetic fabrics with teak leaves extract. Research Journal of Textile and Apparel, v. 24, n. 4, p. 357–374, 2020.
IMTIAZH, M. S. A.; UDDIN, M. A. Extraction and physical characterization of Nymphaea Rubra (water lily) cellulosic fiber for potential textile and green-composite application. International Journal of Biological Macromolecules, v. 305, 141145, 2025.
JIA, Y.; JIANG, H.; Wang, Y. et al. Fabrication of Bio-based Coloristic and Ultraviolet Protective Cellulosic Fabric Using Chitosan Derivative and Chestnut Shell Extract. Fibers and Polymers, v. 23, n. 10, p. 2760–2768, 2022.
KSIBIA, I. E.; SLAMA, R. B.; FAIDIA, K. et al. Mixture approach for optimizing the recovery of colored phenolics from red pepper (Capsicum annum L.) by-products as potential source of natural dye and assessment of its antimicrobial activity. Industrial Crops and Products, v. 70, p. 34–40, 2015.
LIU, L.; JIANG, T.; YAO, J. A Two-Step Chemical Process for the Extraction of Cellulose Fiber and Pectin from Mulberry Branch Bark Efficiently. Journal of Polymers and the Environment, v. 19, p. 568–573, 2011.
LO RE, G.; ENGEL, E. R.; BJÖRN, L. et al. Melt processable cellulose fibres engineered for replacing oil-based thermoplastics. Chemical Engineering Journal, v. 458, 141372, 2023.
MELLO, P. A. V. P.; DA SILVA, C. N.; RIBEIRO, B. D. Valorization of Residual Biomass from Sargassum filipendula for the Extraction of Phlorotannins and Pigments Using Eutectic Solvents. Processes, v. 13, n. 5, p. 1345, 2025.
MORADI, Z.; HAGHJOU, M. M.; ZAREI, M.; SHARIFAN, H. Harnessing Chlorella vulgaris for the phycoremediation of azo dye: A comprehensive analysis of metabolic responses and antioxidant system. Algal Research, v. 82, 103660, 2024.
NOUAA, S. et al. Immobilization of Trametes versicolor laccase on MgFe(LDH)/alginate composite beads for improved textile dyes decolorization. International Journal of Biological Macromolecules, v. 303, p. 140577, 2025.
REDDY, N.; YANG, Y. Natural cellulose fibers from soybean straw. Bioresource Technology, v. 100, p. 3593–3598, 2009.
REN, Y.; FU, R.; FANG, K. et al. Dyeing cotton with tea extract based on in-situ polymerization: An innovative mechanism of coloring cellulose fibers by industrial crop pigments. Industrial Crops and Products, v. 142, 111863, 2019.
SAFAPOUR, S.; RATHER, L. J.; SAFAPOUR, R. et al. Valorization of bio-colorants extracted from Hypericum scabrum L. plant for sustainable and ecological coloration of wool yarns. Heliyon, v. 9, e19439, 2023.
SANGO, T.; YONA, A. M. C.; DUCHATEL, L. et al. Step-wise multi-scale

deconstruction of banana pseudo-stem (Musa acuminata) biomass and morpho-mechanical characterization of extracted long fibres for sustainable applications. Industrial Crops and Products, v. 122, p. 657–668, 2018.

SILVA, A. et al. Preparação e Propriedades de Fibras de Algas. Polímeros, 2020. (Artigo nacional do corpus focado em processos de fiação úmida).

VUKCEVIC, M.; KALIJADIS, A.; RADISIC, M. et al. Application of carbonized hemp fibers as a new solid-phase extraction sorbent for analysis of pesticides in water samples. Chemical Engineering Journal, v. 211-212, p. 224-232, 2012.

ZHENG, Q. et al. Functional dyeing of cellulose macromolecule/synthetic fibers. International Journal of Biological Macromolecules, v. 278, 134964, 2024.

CÓDIGO: ET0493

AUTOR: CAUA VITOR FIGUEREDO SILVA

ORIENTADOR: JOSE ALFREDO FERREIRA COSTA

TÍTULO: Processamento de Linguagem Natural e Aprendizado Não Supervisionado para Organização de Textos: Aplicação à Legislação Municipal

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de métodos de Processamento de Linguagem Natural e aprendizado não supervisionado aplicados à organização de documentos textuais, com ênfase em legislação municipal. A principal aplicação é o Jurix, protótipo de consolidação e rastreabilidade normativa que processa, armazena e consulta localmente normas obtidas por meio da API do SAPL da Câmara Municipal de Natal/RN. O sistema realiza extração textual, OCR, segmentação hierárquica de dispositivos legais, identificação de eventos de alteração normativa, consolidação temporal e recuperação semântica com embeddings e RAG local. No recorte avaliado, foram processadas 356 normas, segmentados 4.916 dispositivos e identificados 712 eventos de alteração. Em eixo metodológico complementar, foram comparadas representações textuais e técnicas de agrupamento em bases externas. O BGE-M3 atingiu ARI de 0,94 em agrupamento direto (K-Means, PT-6News) e de 0,72 na grade topológica do IntraSOM, evidenciando que o desempenho depende do modelo, idioma, domínio e pipeline utilizado. Mapas de Kohonen também permitiram analisar preservação topológica e estrutura de agrupamentos. O trabalho evidencia o potencial da integração entre PLN, recuperação semântica e aprendizado não supervisionado para organização de grandes coleções textuais.

Palavras-chave: PLN. Mapas de Kohonen. Consolidação normativa. Embeddings. Jurix.

TITLE: Natural Language Processing and Unsupervised Learning for Text Organization: An Application to Municipal Legislation

Abstract

This work presents the development and evaluation of Natural Language Processing and unsupervised learning methods for organizing textual documents, with emphasis on municipal legislation. The main application is Jurix, a prototype for normative consolidation and legal traceability that locally processes, stores, and queries norms obtained through the SAPL API of the City Council of Natal/RN, Brazil. The system performs text extraction, OCR, hierarchical segmentation of legal provisions,

identification of normative modification events, temporal consolidation, and semantic retrieval using embeddings and a local RAG architecture. In the evaluated dataset, 356 norms were processed, 4,916 legal provisions were segmented, and 712 modification events were identified. In a complementary methodological axis, textual representations and clustering techniques were compared using external datasets. BGE-M3 reached ARI of 0.94 in direct clustering (K-Means, PT-6News) and 0.72 on the IntraSOM topological grid, showing that performance depends on model, language, domain, and pipeline. Kohonen Self-Organizing Maps were also used to analyze topology preservation and cluster structure. The study highlights the potential of combining NLP, semantic retrieval, and unsupervised learning to support the organization of large textual collections.

Keywords: NLP. Kohonen Maps. Normative Consolidation. Embeddings. Jurix.

Introdução

A organização e a recuperação de informações em grandes coleções documentais constituem desafios relevantes para a Ciência da Computação e para a Inteligência Artificial. Na administração pública, esses desafios se intensificam pela produção contínua de leis, decretos e outros atos normativos, frequentemente alterados ou revogados ao longo do tempo. A ausência de mecanismos automatizados de rastreabilidade e consolidação pode dificultar a identificação do texto vigente e ampliar o esforço necessário à consulta jurídica.

Nesse contexto, técnicas de Processamento de Linguagem Natural (PLN) podem apoiar a extração, segmentação, representação vetorial e recuperação semântica de documentos. Modelos baseados em embeddings permitem representar unidades textuais em espaços vetoriais, enquanto métodos de aprendizado não supervisionado podem auxiliar na identificação de padrões, agrupamentos e relações de similaridade. Entre esses métodos, os Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen (Self-Organizing Maps - SOM) permitem projetar dados de alta dimensionalidade em estruturas de menor dimensão, preservando relações de vizinhança e favorecendo a visualização exploratória.

O trabalho foi desenvolvido em três eixos articulados. O primeiro corresponde ao Jurix, protótipo voltado à consolidação e rastreabilidade de normas municipais. Para os experimentos relatados, foram utilizadas normas obtidas por meio da API do Sistema de Apoio ao Processo Legislativo (SAPL) da Câmara Municipal de Natal/RN. O processamento, armazenamento, indexação e inferência são realizados localmente após a coleta, buscando reduzir dependência de serviços externos.

O segundo eixo consiste em uma avaliação experimental de diferentes representações textuais e algoritmos de agrupamento. Para evitar confusão entre a aplicação jurídica e a avaliação metodológica, esse benchmark utiliza bases públicas externas, como PT-6News e 20 Newsgroups, e não constitui validação direta do Jurix nem de dados da Prefeitura Municipal.

O terceiro eixo investiga o uso do IntraSOM, implementação modular de mapas de Kohonen desenvolvida no ambiente de pesquisa da UFRN, incluindo aspectos de visualização por U-Matrix, preservação topológica e análise de corpora textuais. Experimentos adicionais utilizaram as bases HuffPost e EURLEX57K para estudar, respectivamente, variação semântica temporal e relações conceituais em documentos jurídicos.

Assim, o objetivo geral foi investigar como PLN, representações vetoriais e aprendizado não supervisionado podem apoiar a organização de documentos textuais, combinando

uma aplicação em legislação municipal com experimentos metodológicos controlados em bases externas. A separação entre esses eixos permite avaliar tanto a viabilidade do protótipo jurídico quanto o comportamento das técnicas de representação e agrupamento em diferentes domínios.

Metodologia

A pesquisa foi organizada em três eixos metodológicos complementares, com separação explícita entre a aplicação jurídica e os experimentos realizados em bases externas.

1. Desenvolvimento e avaliação funcional do Jurix. O protótipo foi estruturado para processar localmente, após a coleta, documentos normativos municipais. A ingestão foi realizada pela API REST do Sistema de Apoio ao Processo Legislativo (SAPL) da Câmara Municipal de Natal/RN, considerando normas do período de 1990 a 2025. Documentos digitais foram processados com pdfplumber e arquivos digitalizados com Tesseract OCR. Em seguida, um parser baseado em expressões regulares, estruturado conforme a organização de dispositivos prevista na Lei Complementar nº 95/1998, realizou a segmentação em artigos, parágrafos, incisos e alíneas. Foram implementados mecanismos para identificação de eventos de alteração normativa, incluindo revogações, alterações textuais, acréscimos e renumerações. Esses eventos alimentam um mecanismo de consolidação temporal. Para recuperação semântica, os dispositivos são vetorizados e indexados em PostgreSQL com pgvector, com integração a um módulo RAG executado localmente por meio do Ollama. A avaliação relatada nesta etapa é predominantemente funcional e operacional; não foi realizada, no recorte apresentado, uma avaliação jurídica independente da correção de todas as consolidações ou das respostas geradas pelo módulo RAG.

2. Benchmark de representações textuais e agrupamento. Em experimento separado do Jurix, foram utilizados dois datasets externos: PT-6News, composto por notícias curtas em português distribuídas em seis categorias, e 20 Newsgroups, com quatro classes selecionadas. PT-6News é uma base construída pelo orientador a partir de notícias jornalísticas em português, generalizadas para remover referências a eventos específicos, organizadas em seis categorias temáticas (Política, Economia, Esportes, Turismo, Polícia, Variedades). Foram comparadas quatro representações: TF-IDF com SVD truncada, Sentence-BERT, BGE-M3 e Gemma-300M. Para padronização do espaço experimental, as representações densas foram reduzidas para 20 dimensões antes do agrupamento. Foram avaliados K-Means, DBSCAN, HDBSCAN, Spectral Clustering, Agglomerative Clustering e Gaussian Mixture Models, utilizando ARI e NMI como métricas externas de concordância com os rótulos conhecidos.

3. Experimentos com Mapas Auto-Organizáveis. O IntraSOM foi avaliado em reticulados hexagonais e retangulares, com condições planares e toroidais. Foram analisadas propriedades de visualização e preservação topológica, incluindo U-Matrix e superagrupamento dos protótipos. A divergência entre formulações da U-Matrix foi investigada com 30 repetições, teste de Wilcoxon pareado e correção de Benjamini-Hochberg. Experimentos complementares com HuffPost e EURLEX57K exploraram deslocamento semântico temporal e relações conceituais, respectivamente.

Durante o período de vigência da Iniciação Científica, o bolsista foi responsável, sob orientação do docente, pelo desenvolvimento dos módulos de software do sistema Jurix (ingestão via API SAPL, parser hierárquico conforme a LC 95/1998, motor de consolidação temporal e serviço de recuperação vetorial RAG com pgvector e Ollama), pela curadoria e pré-processamento dos corpora de legislação municipal, 20 Newsgroups,

HuffPost e EURLEX57K, pela implementação da rotina de validação estatística da U-Matrix (Wilcoxon pareado com 30 repetições e correção FDR) e pela condução dos experimentos comparativos de representação e agrupamento topológico no IntraSOM. A base PT-6News foi disponibilizada pelo orientador.

Resultados e Discussões

Os resultados são apresentados separadamente para evitar que os experimentos em bases externas sejam interpretados como validação do Jurix.

1. Jurix. No recorte experimental utilizado, o sistema processou 356 normas municipais obtidas do SAPL da Câmara Municipal de Natal/RN, segmentando 4.916 dispositivos e identificando 712 eventos de alteração normativa. A busca vetorial apresentou latência observada entre 50 e 200 ms nas condições de execução utilizadas. Esse resultado caracteriza o desempenho operacional da recuperação, mas não deve ser interpretado como medida de precisão jurídica ou de qualidade das respostas do módulo RAG. A arquitetura permitiu que armazenamento, indexação e inferência fossem executados localmente após a coleta dos documentos.

2. Representações textuais e agrupamento. Em benchmark direto sobre bases externas (K-Means aplicado ao espaço vetorial reduzido por PCA, sem projeção topológica), o BGE-M3 atingiu ARI=0,941 e NMI=0,935 no PT-6News — o maior valor obtido entre todas as configurações testadas. Em experimento complementar, a mesma representação foi projetada na grade do IntraSOM (10x10, hexagonal toroidal) e reagrupada via K-Means sobre os neurônios, resultando, na configuração 10x10 hexagonal toroidal com 20 Newsgroups, em ARI/NMI de 0,7222/0,6876 para BGE-M3; 0,6637/0,6335 para Gemma-300M; 0,4088/0,4828 para Sentence-BERT; e 0,1257/0,2012 para TF-IDF+SVD — valores tipicamente mais baixos que o benchmark direto por incorporarem a etapa adicional de quantização topológica. No PT-6News, o BGE-M3 obteve ARI=0,7221 e NMI=0,7676. O TF-IDF alcançou ARI=0,6924, enquanto Sentence-BERT obteve ARI=0,1920. Esses resultados não sustentam uma superioridade universal de representações densas; indicam, ao contrário, que o desempenho depende da combinação entre modelo, idioma, domínio e configuração experimental. Entre as representações avaliadas, o BGE-M3 apresentou o melhor desempenho nas configurações reportadas.

3. U-Matrix e validação estatística. A comparação entre formulações da U-Matrix indicou divergência sistemática de escala entre 16,8% e 20,4% nas células intersticiais, embora com alta correlação topológica (r de Pearson > 0,990). No Synthetic Control Dataset, o teste de Wilcoxon com correção FDR rejeitou a hipótese nula em 9 das 12 configurações avaliadas ($p<0,05$), indicando que a diferença observada não se restringiu a flutuações aleatórias nas configurações analisadas.

4. Experimentos complementares. No recorte do HuffPost, foram calculadas medidas de deslocamento semântico temporal por categoria. No EURLEX57K, um grafo baseado em conceitos EUROVOC foi relacionado à organização produzida pelo mapa de Kohonen. Nos experimentos toroidais relatados para HuffPost e EUR-Lex, foi observado erro topográfico TE=0,0000 — métrica que verifica se o neurônio mais próximo e o segundo mais próximo de cada amostra são vizinhos na grade — indicando ausência de descontinuidades na topologia nas configurações avaliadas.

Em conjunto, os resultados mostram duas contribuições distintas: a construção de um protótipo funcional para tratamento de legislação municipal e a avaliação experimental de técnicas de representação e organização de textos em diferentes domínios.

Conclusão

O trabalho permitiu desenvolver e avaliar uma abordagem integrada para organização de documentos textuais, combinando uma aplicação em legislação municipal com experimentos metodológicos em bases externas.

No eixo aplicado, o Jurix alcançou estágio funcional de protótipo, com ingestão de normas do SAPL da Câmara Municipal de Natal/RN, segmentação hierárquica de dispositivos, identificação de eventos de alteração, consolidação temporal e recuperação semântica. A execução local das etapas de processamento, armazenamento, indexação e inferência, após a coleta, reduz a necessidade de envio do conteúdo processado a provedores externos e constitui uma característica relevante para cenários que exigem maior controle sobre os dados.

No eixo experimental, os resultados mostraram que a qualidade do agrupamento depende da representação utilizada, do idioma, do domínio e da configuração do método. O BGE-M3 apresentou o melhor desempenho entre as representações avaliadas nas configurações reportadas, mas o bom resultado do TF-IDF no PT-6News demonstra que métodos clássicos permanecem competitivos em determinados contextos. Os experimentos com IntraSOM e U-Matrix contribuíram para a análise da estrutura topológica dos dados e para a investigação de diferenças entre formulações de visualização.

Os resultados obtidos devem ser interpretados dentro dos limites dos datasets e configurações experimentais utilizados. Os benchmarks com PT-6News, 20 Newsgroups, HuffPost e EURLEX57K são experimentos metodológicos complementares e não constituem validação direta do Jurix ou de dados da Prefeitura Municipal de Natal.

Como trabalhos futuros, propõe-se avaliar o Jurix com métricas específicas de recuperação e validação jurídica por especialistas, ampliar o conjunto de normas processadas e integrar diretamente as representações produzidas pelo sistema a métodos de visualização e agrupamento baseados em SOM. Essa integração permitirá avaliar, em um mesmo corpus jurídico municipal, o potencial dos mapas auto-organizáveis para exploração temática, identificação de similaridades e apoio à gestão do conhecimento normativo.

Referências

BRASIL. Lei Complementar nº 95, de 26 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre a elaboração, a redação, a alteração e a consolidação das leis. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 27 fev. 1998.

CHALKIDIS, I.; FERGADIOTIS, M.; MALAKASIOTIS, P.; ANDROUTSOPOULOS, I. Large-Scale Multi-Label Text Classification on EU Legislation. In: Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL), 2019.

CHEN, J.; XIAO, S.; ZHANG, P.; LUO, K.; LIAN, D.; LIU, Z. M3-Embedding: Multi-Linguality, Multi-Functionality, Multi-Granularity Text Embeddings Through Self-Knowledge Distillation. arXiv:2402.03216, 2024.

COSTA, J. A. F.; NETTO, M. L. A. Unsupervised Learning of Clusters in Neural Network: Improvements in Neural Network Visualization Using Hexagonal Topology. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2007. p. 3060-3065.

DEVLIN, J. et al. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In: Proceedings of NAACL-HLT, 2019. p. 4171-4186.

KOHONEN, T. Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. Biological Cybernetics, v. 43, n. 1, p. 59-69, 1982.

LANG, K. NewsWeeder: Learning to Filter Netnews. In: Proceedings of the 12th International Conference on Machine Learning (ICML), 1995. p. 331-339.

LEWIS, P. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. Advances in Neural Information Processing Systems, v. 33, p. 9459-9474, 2020.

MISRA, R. News Category Dataset. arXiv preprint arXiv:2209.11429, 2022.

REIMERS, N.; GUREVYCH, I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks. In: Proceedings of EMNLP-IJCNLP, 2019. p. 3982-3992.

ULTSCH, A. Self-Organizing Neural Networks for Visualisation and Classification. In: Information and Classification. Berlin: Springer, 1993. p. 307-313.

VESANTO, J.; ALHONIEMI, E. Clustering of the Self-Organizing Map. IEEE Transactions on Neural Networks, v. 11, n. 3, p. 586-600, 2000.

CÓDIGO: ET0497

AUTOR: LIAN DE GUSMAO TABOSA DO EGITO

ORIENTADOR: YURI DANIEL JATOBA COSTA

TÍTULO: Avaliação de deslocamentos axiais permanentes em estaca helicoidal sob carregamento cíclico

Resumo

Este artigo avalia o comportamento de estacas helicoidais instaladas em solo arenoso sob a ação de carregamentos cíclicos de tração quase-estáticos. Com base em ensaios de campo, a resposta do sistema solo-estaca foi analisada e classificada em três regimes de estabilidade: shakedown plástico, fluência plástica e colapso incremental. A investigação focou na influência das componentes de carga média e amplitude cíclica no desenvolvimento da instabilidade da fundação. Os resultados demonstraram o predomínio do regime de fluência plástica e evidenciaram que a magnitude da carga cíclica possui um impacto mais severo na degradação do sistema do que a elevação da carga média isolada. Por meio de análises comparativas, constatou-se que amplitudes cíclicas idênticas produziram respostas divergentes (estabilidade em fluência versus ruptura) mesmo sob intensidades de carga média distintas, impossibilitando a definição de uma fronteira de ruptura determinística baseada apenas nas solicitações instantâneas vigentes. Conclui-se, portanto, que a instabilidade cíclica do sistema solo-estaca é um fenômeno complexo que não é ditado exclusivamente pelo estado atual de tensões, evidenciando a forte dependência do comportamento da fundação em relação ao histórico de solicitações acumulado ao longo dos ciclos.

Palavras-chave: Estaca helicoidal; Carregamento cíclico; Ratcheting; Solo arenoso

TITLE: Evaluation of permanent axial displacements in helical piles under cyclic loading

Abstract

This paper evaluates the behavior of helical piles installed in sandy soil under quasi-static cyclic tensile loading. Based on field tests, the response of the soil-pile system was analyzed and classified into three stability regimes: plastic shakedown, plastic creep, and incremental collapse. The investigation focused on the influence of the mean load and cyclic amplitude components on the development of foundation instability. The results demonstrated the predominance of the plastic creep regime and showed that

the magnitude of the cyclic load has a more severe impact on system degradation than the increase in mean load alone. Through comparative analyses, it was found that identical cyclic amplitudes produced divergent responses (stabilization in creep versus failure) even under different mean load intensities, making it impossible to define a deterministic failure boundary based solely on the current instantaneous loading. It is therefore concluded that the cyclic instability of the soil-pile system is a complex phenomenon that is not dictated exclusively by the current stress state, highlighting the strong dependence of the foundation's behavior on the loading history accumulated over the cycles.

Keywords: Helical pile; Cyclic loading; Ratcheting; Sandy soil

Introdução

1 Introdução

As estacas helicoidais são fundações profundas de aço constituídas por um eixo central ao qual são soldadas uma ou mais placas em formato espiral (Perko, 2009). Durante a instalação, o eixo é rotacionado para dentro do terreno com mínima perturbação ambiental, e as cargas estruturais são subsequentemente transferidas para o solo circundante através das placas helicoidais (Perko, 2009). Essa técnica de fundação reúne diversas vantagens operacionais: rapidez de instalação, baixos níveis de ruído e vibração, possibilidade de execução em áreas de acesso restrito e controle de qualidade por monitoramento do torque aplicado.

Devido a essas particularidades, essas estacas tem sido utilizadas em torres de transmissão, bases de painéis solares, ancoragens de dutos, contenções e reforço de fundações existentes, entre outras aplicações (Perko, 2009; Schiavon et al., 2016).

Estruturas suportadas por estacas helicoidais são frequentemente submetidas a padrões de cargas repetidas, causadas pela ação do vento, ondas marítimas, tráfego de veículos ou variações de temperatura (Tsuha et al., 2012; Richards et al., 2019). A infraestrutura moderna, especialmente no setor de energias renováveis como turbinas eólicas offshore, impõe a essas fundações milhões de ciclos de carregamento ao longo de sua vida útil (Leblanc et al., 2010; Pasten et al., 2014).

Analisando-se o comportamento do sistema solo-estaca sob carregamento cíclico, pode-se destrinchar a resposta do sistema solo-estaca em quatro domínios principais (Werkmeister et al., 2001). O primeiro é a resposta puramente elástica na qual os níveis de tensão são tão mínimos que nenhum elemento atinge o escoamento, sem dissipação de energia; contudo, em prática, essa condição é inexistente. Outro domínio é o shakedown elástico, em que a resposta é plástica nos primeiros ciclos, mas o sistema desenvolve um campo de tensões residuais protetor, e a resposta final se torna estritamente elástica (Xia et al., 2022). Em seguida, tem-se o shakedown plástico, caracterizado quando a estrutura se estabiliza em um estado de equilíbrio dinâmico (Werkmeister et al., 2001). Nesse domínio, a acumulação de deformação plástica cessa completamente, mas uma quantidade finita de energia continua a ser dissipada (Linker et al., 2023; Werkmeister et al., 2001).

O ratcheting configura o modo de falha cíclica mais crítico em fundações profundas sob ciclagem (Giannakos et al., 2012). Diferentemente do colapso abrupto previsto na análise estática, voltada primordialmente ao Estado Limite Último (ELU), o ratcheting leva à perda de funcionalidade da fundação devido a deslocamentos excessivos que superam as tolerâncias da estrutura, voltando a atenção majoritariamente ao Estado Limite de Serviço (ELS) (Pasten et al., 2014). Conforme elucidado por Farias et al. (2026), a delimitação desses domínios de falha e estabilidade em estacas helicoidais em areia é fortemente dependente da amplitude cíclica e o nível de carga que estabelecem fronteiras claras entre a acomodação segura e a instabilidade progressiva. Em estacas, essa falha se manifesta macroscopicamente como um recalque irreversível e acúmulo de rotação na cabeça do elemento de fundação (Tsuha et al., 2012; Rimoy et al., 2013). O regime ratcheting pode ser subdividido em duas categorias: quando a taxa de deformação permanente é baixa e tende a ser aproximadamente constante, tem-se o ratcheting por fluência plástica. Por outro lado, quando é observado um acúmulo sempre crescente e elevado das taxas de deformações no material, ocorre o ratcheting por colapso incremental (Giannakos et al., 2012).

O objetivo deste trabalho é proceder à classificação dos regimes de carregamento observados em quatro ensaios cíclicos de tração com estacas helicoidais, realizados por Costa (2017) e Farias (2019). Os ensaios cíclicos foram executados com carregamento quase-estático em estaca helicoidal de três hélices, instalada em um terreno composto por camadas de areia.

Metodologia

2. Características do terreno e da estaca helicoidal

O solo em estudo é um grande perfil de areia pura, tendo 4 m de areia fofa sobre uma camada de areia mais compacta, como apresentado na Figura 1. A camada superior é classificada pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como areia mal graduada, com coeficiente de uniformidade (Cu) de 1,96, coeficiente de curvatura (Cc) de 0,99 e massa específica dos sólidos (γs) de 26,3 kN/m³.

Figura 1. Perfil do Solo (Costa, 2017)

A Figura 2 ilustra a estaca helicoidal utilizada no estudo. A estrutura possui comprimento total de 4,23 m, sendo constituída por um fuste tubular de aço com diâmetro externo de 73 mm e instrumentada com extensômetros coláveis de resistência elétrica (strain gages). Ao longo de sua extensão, estão dispostas três hélices cujos diâmetros aumentam da base para o topo: 250 mm (inferior), 300 mm (intermediária) e 350 mm (superior).

Figura 2. Ilustração da estaca helicoidal

A estaca foi instalada verticalmente com o auxílio de uma perfuratriz hidráulica modelo MC150, que aplicou torque ao topo da estrutura até atingir sua capacidade máxima, em razão da presença de uma camada resistente. A inserção ocorreu de forma controlada

com uma rotação de aproximadamente 40 rpm e taxa de penetração de 25 mm por rotação, atingindo profundidades de até 2,77 m.

Resultados e Discussões

3 Descrição dos ensaios de campo e compilação dos dados

A montagem das provas de carga à tração envolveu um sistema estrutural e de medição robusto para garantir a precisão dos dados coletados no campo. A estrutura de reação foi composta por duas vigas de aço de 3,0 m de comprimento apoiadas diretamente no solo, sobre as quais foram posicionadas outras duas vigas de aço transversais de 6,0 m. Para a aplicação das cargas durante o ensaio, utilizou-se um cilindro hidráulico vazado com capacidade de 500 kN, ligado a uma bomba hidráulica manual, enquanto a medição precisa do esforço foi feita por uma célula de carga de mesma capacidade instalada acima do cilindro hidráulico. Além disso, os deslocamentos verticais da estaca foram aferidos por quatro relógios comparadores com curso de 50 mm e resolução de 0,01 mm, apoiados em vigas metálicas de referência independentes. Empregou-se também um sistema de aquisição de dados eletrônico para o registro das leituras da instrumentação. Maiores detalhes sobre os ensaios podem ser obtidos em Costa (2017) e Farias (2019).

O programa de ensaios de campo envolveu testes estáticos e cíclicos quase-estáticos. Os resultados das provas de carga estática forneceram uma capacidade de carga estática média (QT) igual a 193 kN (Costa, 2017).

No presente trabalho, são analisados quatro ensaios cíclicos quase-estáticos, aqui denominados A, B, C e D. Esses ensaios almejavam uma análise pertinente para avaliar a influência de diferentes valores de carga cíclica média e amplitude de carga no comportamento da estaca helicoidal instalada no solo arenoso apresentado.

Os ensaios A e B foram realizados por Farias (2019). Cada um desses ensaios foi estruturado em quatro etapas de uma hora, nas quais foram aplicados 60 ciclos de carga e descarga com duração de um minuto cada. A principal distinção entre os dois procedimentos são as diferentes aplicações dos incrementos de carga: no Ensaio A (Tabela 1), utilizaram-se incrementos crescentes de carregamento ao longo das etapas, enquanto no Ensaio B (Tabela 2), os incrementos foram mantidos constantes. Nota-se que no ensaio A a aplicação de 5 ciclos foi suficiente para levar o sistema à ruptura e à interrupção do teste.

Tabela 1. Carregamentos no ensaio A (Farias, 2019)

Tabela 2. Carregamentos no ensaio B (Farias, 2019)

Os ensaios C e D foram executados por Costa (2017) e também foram usados para

avaliar a estaca sob condições de carregamento cíclico quase-estático. No Ensaio C, cada etapa durou uma hora com 60 ciclos de um minuto de carregamento-descarregamento com a carga aplicada oscilando entre os valores mínimos e máximos, conforme apresentado na Tabela 3. Referente aos resultados, observou-se que os primeiros ciclos da etapa inicial apresentaram deslocamentos notavelmente altos, e as etapas subsequentes mostraram um aumento gradual dos deslocamentos acumulados em resposta à elevação da carga média e da amplitude cíclica.

Tabela 3. Carregamentos no ensaio C (Costa, 2017)

O Ensaio D, por sua vez, foi conduzido mantendo-se a carga mínima constante em todas as etapas, enquanto a carga máxima (e a amplitude cíclica) foi aumentada gradualmente, como mostra a Tabela 4. Esse aumento contínuo na amplitude resultou em grandes deslocamentos na última etapa (D-05), levando o sistema à condição de ruptura logo ao alcançar os 60 ciclos previstos, o que evidenciou que o aumento da amplitude cíclica tende a reduzir consideravelmente a estabilidade da estaca e a rigidez do sistema.

Tabela 4. Carregamentos no ensaio D (Costa, 2017)

Durante a execução dos ensaios cíclicos, foram registrados as cargas aplicadas e os respectivos deslocamentos no topo da estaca. Com base nesses dados, determinou-se a taxa de deslocamento permanente (up^*), definida como a diferença incremental entre os deslocamentos permanentes acumulados em dois ciclos consecutivos ($up,i^*=up,i - up,i-1$). Em seguida, calculou-se a taxa média considerando-se apenas os últimos 20 ciclos de cada etapa. A única exceção foi a Etapa 5 do Ensaio A, que compreendeu apenas cinco ciclos. Nesse caso, a média foi calculada com base em todos os ciclos realizados.

Com o valor médio da taxa de deslocamento ($\bar{u}p^*$), procedeu-se à classificação do regime cíclico da estaca. Considerando a complexidade teórica envolvida na caracterização da resposta do solo sob carregamentos cíclicos, adotou-se uma abordagem de classificação simplificada proposta por Brito (2025), a qual se baseia nos estudos de Jardine e Standing (2012), Tsuha et al. (2012) e Rimoy et al. (2013), baseada nos valores obtidos de $\bar{u}p^*$. A partir desses valores, o comportamento do sistema foi classificado nos regimes de shakedown plástico e ratcheting (fluência plástica ou colapso incremental), de acordo com os critérios apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Critério utilizado para classificação do regime cíclico das estacas helicoidais a partir de uma abordagem simplificada

Após identificação do regime de cada ensaio, pôde-se chegar a uma previsão do comportamento da estaca helicoidal para a condição de carregamento a qual foi submetida.

4. Resultados e discussão

4.1 Deslocamentos acumulados

As Figuras 3 a 6 apresentam o comportamento de up* em função dos ciclos. Evidencia-se um comportamento comum a todos os ensaios: a taxa de deslocamento permanente é inicialmente elevada, mas decai drasticamente após os primeiros ciclos, descrevendo uma tendência assintótica em direção a uma variação nula. O estágio em que essa taxa se estabiliza e permanece praticamente nula indica que o sistema solo-estaca atingiu um ponto de equilíbrio em relação ao acúmulo de deformações.

A Figura 3 apresenta a taxa de deslocamento acumulado (ūp*) no topo da estaca durante cada ciclo para o Ensaio A e suas etapas. Nota-se uma grande variação de deslocamento entre o primeiro e o segundo ciclo na etapa 4, mas, posteriormente, o comportamento assintótico com pequenas taxas de deslocamentos guia a tendência, assim como nas demais etapas.

Figura 3. Taxa de Deslocamento Acumulado x Número de Ciclos – Ensaio A

A Figura 3 evidencia a influência direta da magnitude da carga, da amplitude cíclica e do número de ciclos na evolução dos deslocamentos. Nas etapas A-01, A-02 e A-03, caracterizadas por solicitações e amplitudes menores, o sistema absorve a energia inicial rapidamente e consegue estabilizar as deformações ao longo dos ciclos. Em contrapartida, a etapa A-04 exibe um comportamento distinto: submetida aos maiores níveis de carga e amplitude de carga, a fundação perde sua capacidade de acomodação. Sob essas exigências severas, a aplicação de apenas 5 ciclos foi suficiente para deflagrar um deslocamento crítico e levar o sistema à instabilidade. Na 5ª etapa, aumentou a partir do 2º ciclo.

A Figura 4 ilustra a evolução da taxa de deslocamento permanente no topo da estaca ao longo dos ciclos de carga para as etapas do Ensaio B. Nota-se que, após uma variação inicial mais expressiva, com destaque para o pico registrado nos primeiros ciclos da etapa B-04, a resposta do sistema tende a um comportamento assintótico. Essa estabilização é evidenciada pela rápida queda na taxa de deslocamento, que passa a exibir valores pequenos e constantes nas fases subsequentes de todas as etapas.

Figura 4. Taxa de Deslocamento Acumulado x Número de Ciclos – Ensaio B

Analisando-se a interação entre os acréscimos de carga, as amplitudes cíclicas e o número de ciclos, constata-se uma rápida acomodação do solo logo após as solicitações iniciais. Para todas as etapas deste ensaio (B-01 a B-04), as magnitudes de carregamento aplicadas não foram severas o suficiente para desestabilizar a fundação, permitindo que o sistema completasse os 60 ciclos previstos em cada fase com taxas decrescentes. Dessa forma, a estaca operou em um regime seguro, sem atingir um deslocamento de perfil crítico.

No que se refere ao Ensaio C, a Figura 5 apresenta a taxa de deslocamento acumulado ao longo das suas cinco etapas (C-01 a C-05). Observa-se que, embora a etapa C-01 registre uma oscilação inicial notável entre o primeiro e o segundo ciclo, o sistema

rapidamente tende a uma estabilização. Assim como no ensaio anterior, o comportamento geral é assintótico, com taxas de deslocamento caindo drasticamente e se mantendo em níveis mínimos.

Figura 5. Taxa de Deslocamento Acumulado x Número de Ciclos – Ensaio C

A observação das amplitudes de carga e do histórico de ciclos revela que o maciço de solo foi capaz de absorver as energias dissipadas de forma eficiente. Independentemente dos incrementos contínuos de carga aplicados ao longo do ensaio, todas as cinco etapas atingiram a marca de 60 ciclos sem demonstrar sinais de fadiga ou instabilidade progressiva. A relação entre as cargas mínimas e máximas manteve-se em um patamar de estabilização plástica, distanciando o sistema de um cenário de colapso ou de deslocamentos com perfil crítico.

No Ensaio D (Figura 6), a taxa de deslocamento permanente ocorre sob um regime de carregamentos com amplitudes e magnitudes crescentes. Durante as quatro primeiras etapas (D-01 a D-04), a estaca apresenta uma resposta com variações semelhantes aos demais ensaios em que a taxa decai em seus ciclos iniciais, e assume o esperado comportamento assintótico. Contudo, essa tendência diverge na etapa D-05, que exibe um padrão de acúmulo de deformações com tendência ao crescimento nos últimos ciclos, após uma fase inicial de decaimento, seguida de estabilidade.

Figura 6. Taxa de Deslocamento Acumulado x Número de Ciclos – Ensaio D

Enquanto as solicitações menores das etapas D-01 a D-04 permitiram a estabilização do conjunto solo-estaca, as elevadas cargas da etapa D-05 ultrapassaram a capacidade de acomodação do maciço. O alto nível de carga impediu que o sistema atingisse um estado de estabilização com taxas de deslocamentos acumulados próximas a zero, culminando em picos de deslocamento crescentes a cada ciclo, o que caracteriza um comportamento instável para a estaca.

4.2 Classificação dos regimes cíclicos

A resposta cíclica do sistema é avaliada nesta seção por meio da análise da taxa de deslocamento acumulado média ($\bar{u}p^*$) e utilizando a classificação apresentada na Tabela 5. Sob a ação de carregamentos axiais cíclicos, as fundações em estacas podem exibir diferentes regimes de comportamento, tipicamente classificados como estável, instável ou metaestável (estado intermediário) (Tsuha et al., 2012).

O regime estável é caracterizado por deformações plásticas de pequena magnitude que tendem à estabilização, associando-se ao shakedown plástico (Werkmeister et al., 2001; Xia et al., 2022). No regime instável, observa-se um acúmulo progressivo de deslocamentos permanentes a cada ciclo, sem tendência à estabilização, caracterizando o colapso incremental (Rimoy et al., 2013). Entre esses extremos, encontra-se o regime metaestável ou fluência plástica, onde os deslocamentos ocorrem a uma taxa moderada e aproximadamente constante. Na Tabela 6, classifica-se o regime cíclico das estacas helicoidais para as etapas dos quatro ensaios analisados com base nessa abordagem analítica.

Tabela 6. Classificação do regime cíclico das estacas helicoidais a partir da abordagem simplificada

A partir da síntese apresentada na Tabela 6, nota-se o predomínio do regime de fluência plástica, correspondendo a 12 das 18 etapas avaliadas ($0,01 < \bar{u}p^* \leq 0,1$ mm/ciclo). O shakedown plástico ocorreu apenas nas etapas iniciais de menor solicitação, com cargas máximas de até 40 kN e cargas cíclicas inferiores a 10 kN, como A-01, C-01 e C-02. Por outro lado, o colapso incremental ($\bar{u}p^*>0,1$ mm/ciclo) manifestou-se unicamente nos estágios finais A-04 e D-05.

A análise cruzada das componentes de carga revela que a previsão do colapso não pode ser feita com base exclusiva no carregamento atual. Ao comparar as etapas A-04 e C-05, observa-se que ambas foram submetidas à mesma amplitude cíclica (Qcíclica = 20,4 kN). Contudo, a etapa C-05 operou sob uma carga média superior (Qmédia = 77,9 kN) em relação à A-04 (Qmédia = 69,6 kN) e, ainda assim, permaneceu estabilizada em fluência plástica ($\bar{u}p^* = 0,044$ mm/ciclo). Em contrapartida, sob uma carga média menor, A-04 desenvolveu colapso incremental com uma taxa drástica de 5,672 mm/ciclo, rompendo em apenas 5 ciclos.

A série B fornece evidência adicional dessa limitação. Ao longo deste ensaio, o aumento expressivo da carga média (de 20,4 kN na etapa B-01 para 79,8 kN na etapa B-04) sob uma amplitude cíclica mantida praticamente constante (em torno de 11 kN) manteve todas as etapas no regime de fluência. A etapa B-04 suportou uma carga média superior à de A-04 sem apresentar qualquer aceleração na acumulação de deslocamentos.

Dessa forma, os dados da Tabela 6 comprovam que a combinação instantânea das parcelas de carga média e cíclica não explica, isoladamente, a ocorrência da falha. A instabilidade cíclica do sistema solo-estaca é, portanto, um fenômeno complexo que não depende unicamente do estado atual de tensões atuante sobre a fundação.

Conclusão

5 Conclusões

A análise dos ensaios permitiu avaliar a influência das componentes média e cíclica do carregamento sobre o desenvolvimento dos regimes de shakedown plástico, fluência plástica e colapso incremental em estacas helicoidais. Com base na síntese dos dados obtidos ao longo das etapas de carregamento, destacam-se as conclusões abaixo.

O nível de carga cíclica apresentou relação mais evidente com o agravamento da severidade da resposta da estaca do que o nível de carga média. Entretanto, os dados demonstraram que nenhuma dessas grandezas, quando avaliada isoladamente, é capaz de distinguir de forma inequívoca os diferentes regimes cíclicos observados.

Em termos práticos, constatou-se que níveis baixos de carga média e cíclica tenderam a produzir shakedown plástico ou fluência de baixa intensidade. O aumento progressivo

da carga média mantendo-se uma amplitude cíclica reduzida (comportamento típico do Ensaio B) não foi suficiente para desencadear o colapso incremental, mantendo o sistema acomodado no regime de fluência plástica.

A constatação mais crítica do estudo reside na impossibilidade de se estabelecer uma fronteira de ruptura determinística baseada apenas nas parcelas estática e cíclica do carregamento em vigor. Como evidenciado pelos ensaios, diferentes trajetórias de carregamento induziram o sistema a respostas discrepantes sob patamares semelhantes de solicitação, a exemplo da estabilidade apresentada pelo ensaio C frente ao colapso do ensaio A sob as mesmas exigências cíclicas.

Isso sugere que a estabilidade do sistema solo-estaca não é definida unicamente pelos níveis instantâneos de carga aplicados em um dado estágio. Para uma avaliação mais precisa da instabilidade, torna-se necessário considerar o histórico de solicitações e de deformações acumulado ao longo da vida útil da fundação.

Referências

6 Referências

BRITO, M. R. F. Análise de deformações permanentes em estacas helicoidais sob carregamentos cíclicos assimétricos. 2025. 20 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.

COSTA, J. P. S. Comportamento à tração de estacas helicoidais em areia submetidas a carregamentos cíclicos. 2017. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

FARIAS, M. L. A. E. Comportamento à tração de estaca helicoidal instrumentada submetida a carregamento cíclico em solo arenoso. 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

GIANNAKOS, S.; GEROLYMOS, N.; GAZETAS, G. Cyclic lateral response of piles in dry sand: finite element modeling and validation. Computers and Geotechnics, v. 44, p. 116-131, 2012.

JARDINE, R. J.; STANDING, J. R. Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand. Soils and Foundations, v. 52, n. 4, p. 723-737, 2012.

LEBLANC, C.; HOULSBY, G. T.; BYRNE, B. W. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading. Géotechnique, v. 60, n. 2, p. 79-90, 2010.

LINKER, R. et al. Linking the macroscale response of granular materials during drained cyclic loading to the evolution of microstructure, contact network and energy components. Granular Matter, v. 25, n. 45, 2023.

PASTEN, C.; SHIN, H.; SANTAMARINA, J. C. Long-term foundation response to repetitive loading. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 140, n. 4, p. 04013036, 2014.

PERKO, H. Helical piles: a practical guide to design and installation. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

RICHARDS, P. J.; BOND, A. J.; BYRNE, B. W. Monopile performance under multi-directional cyclic loading. Géotechnique Letters, v. 9, p. 1-6, 2019.

RIMOY, S.; JARDINE, R.; STANDING, J. Displacement response to axial cycling of piles driven in sand. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING (ICSMGE), 18., 2013, Paris. Proceedings [...]. Paris: [s. n.], 2013. p. 2387-2390.

SCHIAVON, J. A.; TSUHA, C.; NEEL, A.; THOREL, L. Centrifuge modelling of a single-helix helical anchor subjected to cyclic tensile loading. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), 18., 2016, Belo Horizonte. Anais [...]. São Paulo: ABMS, 2016.

TSUHA, C. H. C.; FORAY, P. Y.; JARDINE, R. J.; YANG, Z. X.; SILVA, M.; RIMOY, S. Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading. Soils and Foundations, v. 52, n. 3, p. 393-410, 2012.

WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Permanent deformation behaviour of granular materials and the shakedown concept. Transportation Research Record, v. 1757, p. 75-81, 2001.

XIA, P.; DENG, W.; SHAO, L.; ZHANG, X. Role of elastic upper limit in shakedown study for granular soils. Transportation Geotechnics, v. 34, 100746, 2022.

FARIAS, Manoel Leandro Araújo e; COSTA, Yuri Daniel Jatobá; QUEIROZ, Felipy Lima de; COSTA, João Paulo da Silva; MACÊDO, Ana Letícia Feitosa de. Cyclic Behaviour of Instrumented Helical Piles in Sandy Soils. Geotechnical and Geological Engineering, v. 44, artigo 213, p. 1-20, 2026.

Anexos



Figura 1. Perfil do Solo (Costa, 2017)



Figura 2. Ilustração da estaca helicoidal



Tabela 1. Carregamentos no ensaio A (Farias, 2019)



Tabela 2. Carregamentos no ensaio B (Farias, 2019)



Tabela 3. Carregamentos no ensaio C (Costa, 2017)



Tabela 4. Carregamentos no ensaio D (Costa, 2017)



Tabela 5. Critério utilizado para classificação do regime cíclico das estacas helicoidais a partir de uma abordagem simplificada



Figura 3. Taxa de Deslocamento Acumulado x Número de Ciclos – Ensaio A



Figura 4. Taxa de Deslocamento Acumulado x Número de Ciclos – Ensaio B



Figura 5. Taxa de Deslocamento Acumulado x Número de Ciclos – Ensaio C



Figura 6. Taxa de Deslocamento Acumulado x Número de Ciclos – Ensaio D



Tabela 6. Classificação do regime cíclico das estacas helicoidais a partir da abordagem simplificada

CÓDIGO: ET0505

AUTOR: JOYCE BISPO AZEVEDO

ORIENTADOR: MAGNA ANGELICA DOS SANTOS BEZERRA SOUSA

TÍTULO: Identificação de microplástico em águas doces e salgadas

Resumo

A poluição por microplásticos em corpos d'água representa uma ameaça à biodiversidade aquática, exigindo métodos ágeis e precisos de identificação. Este trabalho tem como objetivo identificar a presença de microplásticos em amostras de água doce e salgada utilizando triagem por microscopia aliada ao processamento de imagens por inteligência artificial (IA). A metodologia consistiu na coleta de amostras de 1,5 litro de água em 4 diferentes fontes superficiais, sendo duas fontes de água salgada, uma de água doce e uma de água salobra, seguidas de processos de filtração e análise sob microscópio óptico. As partículas que apresentaram morfologia característica de polímeros sintéticos (como fibras e fragmentos) foram fotografadas e submetidas a dois modelos de IA, especificamente o Gemini 3.1 pro (Google LLC) e o Chat GPT GPT-5.6 (OpenAi), para o reconhecimento de potenciais microplásticos. Como etapas futuras da pesquisa, pretende-se aplicar a digestão química para decomposição da matéria orgânica nas amostras e o uso do corante fluorescentes sudan IV para otimizar a diferenciação entre partículas plásticas e resíduos orgânicos.

Palavras-chave: Microplásticos, microscopia óptica, poluição hídrica

TITLE: Identification of microplastics in freshwater and saltwater

Abstract

Microplastic pollution in water bodies poses a threat to aquatic biodiversity, requiring agile and precise identification methods. This study aims to identify the presence of microplastics in freshwater and saltwater samples using microscopy screening combined with image processing through artificial intelligence (AI). The methodology consisted of collecting 1.5-liter water samples from 4 different surface sources—two saltwater, one freshwater, and one brackish water—followed by filtration processes and optical microscope analysis. Particles exhibiting morphological characteristics of synthetic polymers (such as fibers and fragments) were photographed and submitted to two AI models, specifically Gemini 3.1 Pro (Google LLC) and ChatGPT GPT-5.6 (OpenAI), for the recognition of potential microplastics. As future stages of the research, we intend to apply chemical digestion to decompose organic matter in the samples and use the fluorescent dye Sudan IV to optimize the differentiation between plastic particles and organic residues.

Keywords: Microplastics, optical microscopy, water pollution

Introdução

Os microplásticos (MP) são definidos como partículas poliméricas sintéticas, sólidas e insolúveis em água, com dimensão inferior a 5 mm, derivados da fabricação intencional ou da fragmentação de resíduos plásticos no ambiente (LESLIE et al., 2017). A presença desses poluentes nos ecossistemas aquáticos representa uma grave ameaça ambiental, pois a sua ingestão por organismos provoca estresse fisiológico, danos físicos ao trato digestivo e a bioacumulação de compostos químicos tóxicos ao longo da cadeia alimentar (LESLIE et al., 2017; MONTAGNER et al., 2021).
Entretanto, o monitoramento ambiental e a determinação dessas partículas em matrizes hídricas enfrentam consideráveis desafios analíticos (MONTAGNER et al., 2021). A triagem prévia realizada por microscopia óptica para análise morfológica (como fibras e fragmentos) é um processo altamente trabalhoso e sujeito a erros de interpretação visual. Para contornar essa limitação, a associação da microscopia com o processamento de imagens por inteligência artificial (IA) surge como uma alternativa promissora para automatizar e conferir agilidade à identificação preliminar dos materiais sintéticos.
Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo identificar a presença de microplásticos em amostras de água coletadas em quatro fontes superficiais distintas, contemplando ambientes de água doce, salobra e salgada. A metodologia proposta combina processos convencionais de filtração e microscopia óptica ao emprego dos modelos de IA Gemini 3.1 Pro e ChatGPT GPT-5.6 para acelerar e otimizar o reconhecimento de potenciais microplásticos.

Metodologia

2.1 Coleta e amostragem de água

As atividades de amostragem foram divididas em duas coletas distintas até o momento, contemplando quatro locais diferentes (figura 1), sendo eles o local A: praia de Santa Rita na altura do aquário Natal, local B: Via costeira, local C: Rio Doce ponto na Redinha e local D: Estuário Potengi na Redinha, em frente a base da Marinha. Foram coletadas alíquotas de 1,5 L de água superficial em cada local, sendo os locais A e B correspondentes a água salgada, o local C a uma matriz de água doce e o local D de água salobra. Durante todas as etapas de coleta e manuseio foram adotados procedimentos padronizados de controle para evitar a contaminação por partículas sintéticas do ambiente.

2.2. Filtração e triagem por microscopia óptica

As amostras coletadas foram submetidas ao processo de filtração para a retenção e isolamento do material particulado suspenso. O resíduo retido nos filtros passou por triagem visual primária via microscopia óptica, identificando a presença de partículas com morfologia característica de polímeros sintéticos, especificamente fibras e fragmentos.

2.3.Processamento de imagens e identificação por Inteligência Artificial (IA)

As partículas identificadas como potenciais microplásticos na triagem foram fotografadas sob o microscópio utilizando um smartphone Samsung A26. Em seguida as imagens capturadas foram submetidas a modelos de inteligência artificial, sendo utilizados o Gemini 3.1 pro (Google LLC) e o ChatGPT GPT-5.6 (OpenAi), em um primeiro momento momento as fotos eram enviadas sozinhas e separadamente, sem contexto e se analisava a resposta do programa, em seguida eram enviadas novamente utilizando o seguinte comando: “Esta imagem consiste em uma fotomicrografia proveniente da análise de 1,5 L de água salgada/doce/salobra, cujo material particulado foi retido em um filtro analítico de microfibra. Com base na morfologia apresentada, qual é a provável natureza da estrutura em destaque?” com o objetivo de acelerar a triagem e confirmar o diagnóstico morfológico.

Resultados e Discussões

A triagem morfológica das amostras indicou a ocorrência de partículas compatíveis com microplásticos em pontos específicos das duas campanhas. Na primeira campanha de amostragem, realizada em quatro locais distintos, a ocorrência de partículas esteve restrita ao local A, no qual foram identificadas três partículas suspeitas por meio da triagem sob microscopia óptica (figura 2) e confirmada a possibilidade pelo modelo de IA utilizado, não sendo registrada nenhuma ocorrência nos locais B, C ou D.
Na segunda amostragem, foi identificada uma partícula suspeita no local A (figura 3) e duas partículas no local B (figura 3), enquanto os locais C e D não apresentaram indícios visualmente detectáveis. No somatório das duas campanhas, cobrindo quatro locais analisados, foram contabilizadas 6 partículas com características morfológicas compatíveis com polímeros sintéticos.
Estes resultados preliminares sugerem a presença de microplásticos em pelo menos dois dos pontos analisados, demonstrando a sensibilidade na detecção dessas partículas mesmo a partir de um volume reduzido de amostragem (1,5 L). A integração entre a triagem por microscopia óptica e o modelo de inteligência artificial otimizou a identificação de aspectos morfológicos característicos, como fibras e fragmentos, conferindo maior agilidade ao processo.
Entretanto, ressalta-se o caráter preliminar desses dados. A triagem visual isolada não permite afirmar categoricamente a natureza plástica das 6 partículas encontradas, visto que resíduos orgânicos ou minerais podem apresentar aspectos visuais semelhantes sob o microscópio. Dessa forma, os materiais detectados são classificados estritamente como potenciais microplásticos, sendo indispensável a posterior aplicação da digestão química e da coloração fluorescente com Sudan IV para a eliminação de interferentes e confirmação composicional definitiva nas próximas coletas.

Conclusão

O estudo demonstrou a viabilidade da triagem por microscopia óptica aliada à inteligência artificial para a detecção inicial de microplásticos em matrizes hídricas. A aplicação da metodologia em ecossistemas aquáticos distintos (abrangendo diferentes corpos d'água de água doce e salgada ao longo das duas campanhas) permitiu identificar

um total de 6 potenciais microplásticos. Foram identificados seis potenciais microplásticos em pelo menos dois locais distintos. Com o andamento do trabalho e repetição das coletas é possível verificar se aparecerão microplásticos em outros locais e a frequência em cada um deles. uma distribuição uniforme entre os ambientes.

Embora o modelo de IA tenha otimizado a triagem visual e a identificação morfológica de fibras e fragmentos, conclui-se que a análise óptica isolada possui caráter preliminar. A confirmação definitiva de que as partículas encontradas são de fato microplásticos requer a execução das etapas de digestão química e coloração com Sudan IV, indispensáveis para eliminar interferentes orgânicos e consolidar a metodologia como uma ferramenta rápida de monitoramento ambiental.

Referências

GOOGLE LLC. Gemini, 3.1 Pro. [s.l.]: Google LLC, 2026. Análise de imagens para suporte ao diagnóstico morfológico de microplásticos. Disponível em: https://gemini.google.com. Acesso em: 21 jul. 2026.

LESLIE, H. A.; BRANDSMA, S. H.; VAN VELZEN, M. J. M.; VETHAAK, A. D. Microplastics en route: Field measurements in the Dutch river delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota. Environment International, v. 101, p. 133–142, 2017.

OPENAI. ChatGPT, GPT-5.6. [s.l.]: OpenAI, 2026. Análise de imagens para suporte ao diagnóstico morfológico de microplásticos. Disponível em: https://chatgpt.com. Acesso em: 23 jul. 2026.

MONTAGNER, Cassiana C.; DIAS, Mariana Amaral; PAIVA, Eduardo Maia; VIDAL, Cristiane. MICROPLÁSTICOS: OCORRÊNCIA AMBIENTAL E DESAFIOS ANALÍTICOS. Quimica nova, 2021.

Anexos



Figura 1. Localização dos Pontos de Amostragem



Figura 2. Potenciais microplásticos identificado na primeira coleta



Figura 3. Potenciais microplásticos identificado na segunda coleta

CÓDIGO: ET0513

AUTOR: ROBERTO RONALDO LOPES DE FREITAS

COAUTOR: MARCIA REGINA DA SILVA PEDRINI

COAUTOR: LUIZ DA SILVA FERREIRA JUNIOR

COAUTOR: THAÍS BEZERRA VERÍSSIMO MIGUEL

ORIENTADOR: KATIA NICOLAU MATSUI

TÍTULO: Bebida fermentada à base de casca de acerola – desenvolvimento e caracterizações

Resumo

A valorização de subprodutos agroindustriais constitui uma alternativa para reduzir desperdícios e desenvolver produtos de maior valor agregado. Este estudo teve como objetivo desenvolver uma bebida fermentada do tipo espumante a partir da casca de acerola (*Malpighia emarginata DC.*) e avaliar suas características físico-químicas e sensoriais. O mosto foi obtido pela extração da casca em água, seguido de ajuste dos sólidos solúveis e fermentação alcoólica com *Saccharomyces bayanus*. Após a obtenção do produto da primeira fermentação, realizou-se uma segunda fermentação em garrafa pelo método tradicional. Foram determinados pH, acidez total titulável, acidez volátil, sólidos solúveis totais, teor alcoólico estimado e parâmetros instrumentais de cor. A aceitação sensorial foi avaliada por 86 provadores não treinados utilizando escala hedônica de nove pontos. O fermentado do tipo espumante apresentou pH de 3,25 ± 0,01, acidez total titulável de 37,37 ± 1,43 meq/L^{-1}, acidez volátil de 0,67 ± 0,29 meq/L^{-1}, 5,18 ± 0,03 °Brix e teor alcoólico estimado de 8,11% (v/v). Na avaliação sensorial, foram obtidas médias de 7,40 para aparência/cor, 7,07 para impressão global, 6,92 para sabor e 6,91 para aroma, demonstrando boa aceitação pelos provadores. Os resultados evidenciam o potencial da casca de acerola como matéria-prima para obtenção de uma bebida fermentada do tipo espumante e demonstram a possibilidade de agregar valor a esse subproduto agroindustrial.

Palavras-chave: Fermentado de frutas; Resíduo de acerola; Bebida Espumante.

TITLE: Acerola Peel-Based Fermented Beverage – Development and Characterization

Abstract

The valorization of agro-industrial by-products is an alternative for reducing waste and developing higher value-added products. This study aimed to develop a sparkling fermented beverage from acerola peel (*Malpighia emarginata DC.*) and evaluate its physicochemical and sensory characteristics. The must was obtained by extracting the peel in water, followed by adjustment of the soluble solids content and alcoholic fermentation using *Saccharomyces bayanus*. After obtaining the product of the first fermentation, a second fermentation was carried out in the bottle using the traditional method. The pH, total titratable acidity, volatile acidity, total soluble solids, estimated alcohol content, and instrumental color parameters were determined. Sensory acceptance was evaluated by 86 untrained panelists using a nine-point hedonic scale. The sparkling fermented beverage presented a pH of 3.25 ± 0.01, total titratable acidity of 37.37 ± 1.43 meq/L^{-1}, volatile acidity of 0.67 ± 0.29 meq/L^{-1}, 5.18 ± 0.03 °Brix, and an estimated alcohol content of 8.11% (v/v). In the sensory evaluation, mean scores of 7.40 for appearance/color, 7.07 for overall impression, 6.92 for flavor, and 6.91 for aroma were obtained, demonstrating good acceptance among the panelists. The results highlight the potential of acerola peel as a raw material for producing a sparkling fermented beverage and demonstrate the possibility of adding value to this agro-industrial by-product.

Keywords: Fruit fermented beverage; Acerola residue; Sparkling beverage.

Introdução

O Brasil ocupa a terceira posição no ranking mundial de produção de frutas, atrás apenas da China e da Índia (Abrafrutas, 2024). Essa produção é favorecida pelas condições climáticas e pela extensão territorial do país, que permitem colheitas ao longo de todo o ano (Embrapa, 2022). Entretanto, perdas e desperdícios ocorrem em diferentes etapas da cadeia produtiva, resultando na geração de subprodutos como cascas, sementes e bagaços (Pereira *et al.*, 2022). Quando descartados inadequadamente, esses materiais podem contribuir para a emissão de gases de efeito estufa e para a degradação dos solos e dos recursos hídricos (Pandey *et al.*, 2025). Além dos impactos ambientais, seu não aproveitamento representa a perda de matérias-primas com potencial de valorização, por serem fontes de compostos bioativos, fibras, óleos e antioxidantes (Almaraz-Sánchez *et al.*, 2022; Capanoglu *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a economia circular surge como estratégia para reintegrar subprodutos às cadeias produtivas, reduzir o desperdício de recursos e minimizar impactos ambientais (Reguengo *et al.*, 2022). Entre as frutas brasileiras que podem ser exploradas por essa abordagem, destaca-se a acerola (*Malpighia emarginata DC.*), também denominada cereja-das-Antilhas, reconhecida por sua relevância nutricional e agroindustrial (Vilvert *et al.*, 2024). Durante seu processamento industrial, são geradas grandes quantidades de resíduos que podem apresentar níveis mais elevados de compostos bioativos e atividade antioxidante do que a polpa ou o suco da fruta (Miskinis *et al.*, 2023). Apesar desse potencial, esses materiais ainda são subutilizados e destinados principalmente à fertilização do solo, à alimentação animal ou à incineração (Macêdo *et al.*, 2025).

O aproveitamento da casca de acerola em processos fermentativos constitui, portanto, uma alternativa tecnológica promissora para transformar recursos subutilizados em novos produtos alimentícios e agregar valor a essa matéria-prima (Saud *et al.*, 2024; Di Gianvito *et al.*, 2019). Entre as rotas de processamento, destacam-se as bebidas fermentadas do

tipo espumante, obtidas por uma segunda fermentação alcoólica a partir de um fermentado base. Esse processo promove a formação e a retenção de dióxido de carbono, contribuindo para as características de espuma e sensoriais do produto (Torresi *et al.*, 2011). No método tradicional, a segunda fermentação ocorre na própria garrafa; no método *Charmat*, em tanques de aço inoxidável resistentes à pressão (Guerra *et al.,* 2019).

No âmbito regulatório, a legislação brasileira estabelece que a denominação "vinho" é exclusiva para produtos obtidos da fermentação do mosto de uva. Assim, para produtos elaborados com outras matérias-primas, emprega-se o termo "bebida fermentada do tipo espumante" (Brasil, 1988). O desenvolvimento dessas bebidas acompanha a diversificação do setor e contribui para a valorização de matérias-primas regionais. A integração de análises físico-químicas, avaliação sensorial e intenção de compra é relevante para caracterizar a qualidade e estimar o potencial de mercado de produtos inovadores obtidos de subprodutos agroindustriais (Merlino *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2021). Diante disso, este estudo teve como objetivo desenvolver uma bebida fermentada do tipo espumante à base de casca de acerola e avaliar suas características físico-químicas, aceitação sensorial e intenção de compra, como abordagem sustentável alinhada aos princípios da economia circular.

Metodologia

Recebimento do resíduo da casca de acerola.

As cascas de acerola (Malpighia emarginata DC.) foram obtidas por doação da indústria de polpa de frutas Delícia da Fruta Ltda., localizada em Macaíba-RN, Brasil (5°52'14.2"S; 35°19'17.9"W). O desenvolvimento experimental foi realizado no Complexo de Laboratórios de Engenharia de Alimentos (CLEA), do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Após o recebimento, o material foi porcionado, acondicionado em sacos plásticos e imediatamente congelado, visando preservar a integridade da matéria-prima e minimizar reações químicas ou enzimáticas indesejáveis.

Elaboração da bebida fermentada do tipo espumante da casca de acerola.

A elaboração da bebida fermentada do tipo espumante de acerola foi conduzida pelo método tradicional como mostrado na **figura 1**, com adaptações específicas para a matriz utilizada, conforme metodologias descritas por Bertagnolli *et al.* (2017), Guerra *et al*. (2019) e Silveira *et al*. (2024).

O mosto foi preparado na proporção de 1:5 (m/v) de casca de acerola para água potável. Inicialmente, a água foi aquecida até atingir 75 °C e, em seguida, as cascas de acerola foram imersas nessa água por 15 min, visando à extração de compostos solúveis. Após esse período, o mosto foi filtrado e resfriado à temperatura ambiente até atingir 35 °C. Após o resfriamento, foi realizada a chaptalização com sacarose comercial, ajustando o teor de sólidos solúveis até atingir aproximadamente 14 °Brix.

A fermentação alcoólica primária foi iniciada pela inoculação de 2,5 g de levedura comercial *Saccharomyces bayanus* (Red Star Premier Blanc), conduzida em recipiente de vidro por 16 dias (**Figura 2**). O processo foi monitorado diariamente por meio da determinação da densidade da solução com um auxílio de um densímetro. Após a primeira fermentação, o fermentado base obtido foi submetido à clarificação por duas semanas, visando à sedimentação de sólidos e estabilização do produto.

Posteriormente, para a segunda fermentação, o fermentado base recebeu adição de sacarose na concentração de 8 g/L e foi envasado em garrafas champanheiras de vidro âmbar (**Figura 3**). As garrafas permaneceram armazenadas por três meses, até a abertura da primeira unidade para avaliação.

Caracterização físico-química

As características físico-químicas da bebida foram determinadas em triplicata, com base nas metodologias descritas por Rizzon (2010), com adaptações. O pH foi determinado por método potenciométrico, utilizando pHmetro digital de bancada (pH 140, Simpla, China) previamente calibrado a 20 °C com soluções-tampão de pH 3,0 e 4,0. A acidez titulável foi determinada por titulação ácido-base com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 N, utilizando fenolftaleína como indicador, sendo os resultados expressos em mEq L^{-1}. A acidez volátil foi determinada pelo método de destilação por arraste de vapor, utilizando ácido cítrico para acidificação da amostra.

Os sólidos solúveis totais foram determinados por refratometria e expressos em °Brix. A densidade relativa foi determinada por aerometria a 20 °C, utilizando densímetro, conforme o procedimento também descrito por Rizzon (2010). O teor alcoólico do fermentado base foi estimado a partir dos valores de extrato original e extrato aparente, empregando equações baseadas nas relações de balanço de massa da fermentação e nos procedimentos analíticos descritos e discutidos por Spedding (2016). O cálculo envolveu a determinação do extrato original, do extrato real, da atenuação aparente e da atenuação real, sendo posteriormente obtido o teor alcoólico em massa (ABW) e convertido para teor alcoólico em volume (ABV). Para as bebidas submetidas à segunda fermentação em garrafa, o teor alcoólico foi corrigido considerando o acréscimo de álcool decorrente dessa etapa.

A cor das amostras foi determinada instrumentalmente utilizando colorímetro portátil (TE200, Tecnal, Brasil), por meio do sistema CIELAB, sendo avaliados os parâmetros L* (luminosidade), a* (coordenada vermelho–verde) e b* (coordenada amarelo–azul).

Análise Sensorial

A análise sensorial foi realizada após a aprovação do projeto pelo Comitê de Ética em Pesquisa Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (CEP Central/UFRN), conforme Parecer Consubstanciado nº 8.416.428 e CAAE 94579725.0.0000.5537, em conformidade com a Resolução nº 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde. A avaliação contou com a participação de 86 provadores adultos, não treinados, recrutados entre alunos, funcionários da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e membros da comunidade interessados em participar da pesquisa, conforme os critérios estabelecidos no protocolo aprovado.

Os participantes foram previamente informados sobre os objetivos e procedimentos da pesquisa e, após concordarem em participar, assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). Foram considerados os critérios de exclusão estabelecidos no protocolo, incluindo idade inferior a 18 anos, gestação ou lactação, uso de medicamentos incompatíveis com a ingestão de álcool, histórico de dependência alcoólica, alergias ou intolerâncias aos componentes das amostras e condições clínicas que pudessem interferir na avaliação sensorial.

Foram avaliados os atributos de cor, aroma, sabor e aspectos gerais. Para a avaliação da aceitação, foi utilizada uma escala hedônica de nove pontos, variando de 1 ("desgostei muitíssimo") a 9 ("gostei muitíssimo"). Também foi avaliada a intenção de compra do produto por meio de uma escala de cinco pontos, variando de 1 ("certamente não compraria") a 5 ("certamente compraria").

Resultados e Discussões

Caracterização físico-química

A **Tabela 1** apresenta os parâmetros físico-químicos obtidos para o mosto, fermentado base e espumante de resíduo de acerola, confrontando-os com os limites fixados pela legislação brasileira para fermentados de frutas. Os resultados foram comparados com dados reportados na literatura para bebidas fermentadas elaboradas a partir de diferentes frutas e seus subprodutos, com ênfase em matrizes semelhantes à utilizada neste estudo. Essa comparação permite contextualizar as características do espumante de resíduo de acerola e compreender as alterações observadas ao longo das etapas de fermentação, considerando as particularidades associadas à composição das diferentes matérias-primas.
O resíduo de acerola apresentou pH de 3,51 ± 0,03 e acidez total de 57,96 ± 0,71 meq/L^{-1}. O pH obtido foi próximo ao valor de 3,49 ± 0,07 reportado por Segtowick *et al*. (2013) para a polpa de acerola, indicando que o resíduo preserva as características de acidez semelhantes às da matéria-prima. Em comparação com outras frutas utilizadas na elaboração de bebidas fermentadas, o pH do resíduo de acerola foi superior ao observado para a polpa de umbu (3,04 ± 0,11) por Silveira *et al*. (2024) e foi inferior ao pH do mosto de melão (4,4 ± 0,1) relatado por Salas-Millán *et al*. (2023). Essas diferenças podem estar associadas às particularidades da composição de cada matéria-prima, considerando que a acidez da acerola está relacionada à presença de diferentes ácidos orgânicos e pode sofrer alterações durante a maturação (Vendramini; Trugo, 2000).

Após a fermentação alcoólica, o fermentado base de resíduo de acerola apresentou pH de 3,04 ± 0,02 e acidez total de 60,94 ± 0,00 meq L^{-1}, evidenciando redução do pH e discreto aumento da acidez total em relação ao resíduo. Comportamento qualitativo semelhante de acidificação foi reportado por Yu *et al.* (2025) em fermentado elaborado a partir de bagaço de framboesa. A acidez total do fermentado base de resíduo de acerola (60,94 ± 0,00 meq L^{-1}) mostrou-se inferior aos 104,18 ± 0,19 meq L^{-1} relatados por Silveira *et al.* (2024) para o fermentado base de umbu. Além disso, quando confrontada com a literatura para a mesma fruta, essa acidez obtida com o resíduo foi significativamente menor do que as acidentes relatadas por Segtowick *et al*. (2013) para fermentados secos de polpa de

acerola (98,78 ± 0,44 meq L^{-1}) e de suco de acerola (135,33 ± 0,50 meq L^{-1}). As alterações observadas no pH e na acidez total sugerem modificações no equilíbrio ácido da matriz durante a fermentação, possivelmente relacionadas à produção e ao metabolismo de ácidos orgânicos pelas leveduras, processos que podem modificar a composição ácida e, consequentemente, o pH do fermentado (Ferreira; Mendes-Faia, 2020).
O espumante de resíduo de acerola apresentou pH de 3,25 ± 0,01, valor próximo ao observado por Zou (2025) para a bebida fermentada de romã da cultivar Hei Mei Ren (3,12 ± 0,00) e inferior aos valores relatados para o espumante de umbu (3,40 ± 0,03; Silveira *et al*., 2024), o espumante de goiaba (3,6 ± 0,2; Bertagnolli *et al.*, 2017) e o espumante de melão (4,1 ± 0,0; Salas-Millán *et al.*, 2023). Essas diferenças refletem a composição intrínseca de cada matéria-prima: a acerola é naturalmente mais ácida que a goiaba e o melão devido à maior concentração de ácido ascórbico e málico (Vendramini; Trugo, 2000), enquanto o umbu, embora ácido, apresenta perfil de ácidos orgânicos distinto (Silveira *et al*., 2024).

Quando comparado a fermentados elaborados com polpa de acerola, o pH do espumante de casca (3,25) mostrou-se semelhante ao relatado por Segtowick *et al.* (2013) para fermentados de polpa (3,30–3,40) e de suco de acerola (3,38–3,45), indicando que o resíduo mantém características de acidez próximas às da polpa. Esse resultado é relevante, pois demonstra que a casca, embora seja um subproduto, preserva o potencial ácido da fruta, sendo adequada para a produção de bebidas fermentadas. Entretanto, embora o pH seja comparável, a acidez total titulável do espumante de casca (37,37 meq/L^{-1}) foi significativamente inferior à observada por Segtowick *et al.* (2013) para fermentados de polpa (98,78 ± 0,44 meq/L^{-1}) e de suco (135,33 ± 0,50 meq/L^{-1}). Essa diferença sugere que os ácidos orgânicos responsáveis pela acidez total estão majoritariamente concentrados na polpa e no suco, enquanto a casca contribui mais com fibras, compostos fenólicos e outros sólidos insolúveis do que com ácidos solúveis (Miskinis *et al*., 2023). Essa hipótese é corroborada pela menor concentração de sólidos solúveis totais observada no resíduo (7,84 °Brix) em comparação aos valores típicos da polpa de acerola (8,0–10,0 °Brix; Segtowick *et al.*, 2013).
A acidez volátil apresentou redução entre o fermentado base e o espumante de resíduo de acerola, passando de 2,80 ± 0,00 para 0,67 ± 0,29 meq/L^{-1}. O teor final do espumante de acerola foi inferior aos reportados, na mesma unidade, para o espumante de umbu (5,56 ± 0,02 meq/L^{-1}), obtido por Silveira *et al*. (2024), e para o espumante de goiaba (13,1 ± 0,6 meq/L^{-1}), descrito por Bertagnolli et al. (2017). Adicionalmente, o valor obtido foi inferior à acidez volátil média observada em fermentados elaborados com acerola, produzidos a partir de polpa (3,91 ± 0,67 meq/L^{-1}) e suco (4,68 ± 0,93 meq/L^{-1}), conforme relatado por Segtowick et al. (2013). Esses resultados indicam baixa concentração de ácidos voláteis na bebida elaborada, condição desejável por estar associada à prevenção de alterações sensoriais indesejáveis, como sabor pungente e odor acético (Zhou et al., 2026). Além disso, a acidez volátil do espumante de resíduo de acerola permaneceu abaixo do limite máximo de 20 meq/L estabelecido pela legislação brasileira para fermentados de frutas (Brasil, 2012).

Os sólidos solúveis totais diminuíram de 7,84 ± 0,02 °Brix no resíduo para 5,31 ± 0,05 °Brix no fermentado base e 5,18 ± 0,03 °Brix no espumante. Esse comportamento de declínio progressivo assemelha-se ao observado em bebidas obtidas de outros resíduos, como no espumante de subproduto de melão, cujo teor de sólidos solúveis decresceu de 21,3 ± 0,7 °Brix para 8,5 ± 0,0 °Brix (Salas-Millán *et al.*, 2023), e no fermentado de

bagaço de framboesa, no qual também foi observado consumo de açúcares durante a fermentação (Yu *et al*., 2025). Paralelamente, o teor alcoólico estimado foi de 6,61% no fermentado base e 8,11% no espumante, sendo o valor final inferior aos relatados para o espumante de subproduto de melão (12,3% v/v) por Salas-Millán *et al*. (2023) e para o fermentado de bagaço de morango (10,13 ± 0,05% vol) por Zhou *et al*. (2026), porém superior aos 7,6% v/v obtidos para o fermentado de resíduo de framboesa por Yu *et al*. (2025). A redução dos sólidos solúveis, associada à formação de etanol, é compatível com o metabolismo fermentativo das leveduras, no qual açúcares fermentescíveis são utilizados como substrato para a produção de etanol e dióxido de carbono (Salas-Millán *et al.*, 2023). O aumento do teor alcoólico estimado entre o fermentado base e o espumante sugere a continuidade da atividade fermentativa durante a segunda fermentação, resultando em incremento adicional na concentração estimada de etanol (Silveira *et al.*, 2024; Salas-Millán *et al*., 2023). O teor alcoólico estimado do produto final encontra-se dentro da faixa de estabelecida pela legislação brasileira para fermentados de frutas (Brasil, 2012).

Os parâmetros instrumentais de cor apresentaram alterações ao longo da elaboração do espumante de resíduo de acerola. A luminosidade (L*) permaneceu relativamente estável entre o resíduo (19,58) e o fermentado base (19,05), aumentando para 21,18 no espumante. A coordenada a* aumentou de 1,66 para 4,28 após a primeira fermentação, indicando maior contribuição da componente vermelha no fermentado base, mas diminuiu para −0,038 no produto final. A coordenada b* também apresentou variação durante o processo, aumentando de 5,93 no mosto para 15,49 no fermentado base e diminuindo posteriormente para 6,07 no espumante. Essas variações evidenciam modificações no perfil cromático ao longo das etapas de fermentação. Durante a elaboração de bebidas fermentadas de frutas, alterações de cor podem estar associadas à extração e às transformações de pigmentos da matriz, incluindo reações envolvendo antocianinas e outros compostos fenólicos, influenciadas pelas condições de processamento e fermentação (Zhou *et al*., 2026).

Em comparação com outras bebidas fermentadas produzidas a partir de frutas e seus subprodutos, o espumante de resíduo de acerola apresentou menor luminosidade. Zhou *et al.* (2026) reportaram L* de 61,32 para fermentado produzido a partir de bagaço de morango, valor superior ao observado no presente estudo (21,18). Os autores também verificaram redução de a* após a fermentação nos diferentes tratamentos empregados, comportamento semelhante ao observado entre o fermentado base e o espumante de acerola. Para a coordenada b*, o fermentado base apresentou valor de 15,49, próximo ao observado por Wang *et al.* (2025) em fermentado elaborado exclusivamente com bagaço de uva, cujo b* atingiu aproximadamente 15,00 após oito dias de fermentação. No espumante de acerola, entretanto, b* diminuiu para 6,07, enquanto os fermentados de morango avaliados por Zhou *et al.* (2026) apresentaram valores entre 22,59 e 42,51. Essas diferenças evidenciam que o perfil cromático de bebidas fermentadas de frutas é influenciado pelas características da matéria-prima e pelas condições empregadas durante sua elaboração.

Análise Sensorial

A avaliação sensorial demonstrou boa aceitação do espumante elaborado a partir do resíduo de acerola, com médias de 7,40 para aparência/cor, 7,07 para impressão global, 6,92 para sabor e 6,91 para aroma. Considerando a escala hedônica de nove pontos

utilizada, esses resultados situam os atributos entre as categorias “gostei moderadamente” e “gostei muito”, com maior aceitação para aparência e cor. Resultados semelhantes foram observados por Silveira *et al.* (2024) para espumante de umbu, que apresentou médias de 7,5 para aparência, 6,9 para aroma, 6,8 para impressão global e 6,3 para sabor, indicando que espumantes elaborados a partir de matérias-primas frutíferas não convencionais podem apresentar aceitação satisfatória pelos consumidores. No presente estudo, destaca-se a avaliação do sabor, cuja média foi superior à reportada para o espumante de umbu. Em fermentados de acerola, Segtowick *et al.* (2013) também observaram boa aceitação sensorial, especialmente para formulações suaves, com médias de 7,29 para sabor e 7,37 para avaliação global. Apesar da menor acidez total titulável observada no presente estudo, a aceitação do sabor foi próxima à relatada pelos autores, sugerindo um equilíbrio gustativo adequado. Essa aceitação pode estar associada à menor acidez total, que possivelmente conferiu uma percepção menos agressiva ao paladar, em interação com o teor alcoólico estimado de 8,11% e o dulçor residual da bebida.

Embora o aroma tenha apresentado a menor média entre os atributos avaliados, seu valor ainda demonstra aceitação positiva do produto. A percepção sensorial de bebidas fermentadas de frutas está associada tanto às características da matéria-prima quanto às transformações decorrentes do processamento e da fermentação, que podem modificar a composição de compostos responsáveis pelo aroma e sabor (Zhou *et al*., 2026). Em fermentado de morango, Zhou *et al*. (2026) demonstraram que diferentes estratégias de processamento modificaram o perfil de compostos voláteis e, consequentemente, as características sensoriais da bebida. Os autores destacaram a contribuição de terpenos, como o linalol, para notas florais e frutadas, e observaram que a percepção aromática resulta da interação entre diferentes compostos voláteis. Esses resultados reforçam que as características de aroma e sabor de fermentados de frutas dependem tanto da composição da matéria-prima quanto das condições empregadas durante o processamento e a fermentação. Em conjunto, esses resultados indicam que a casca de acerola, embora apresente menor acidez que a polpa, pode ser utilizada para produzir bebidas fermentadas com boa aceitação sensorial, agregando valor a um subproduto que seria descartado.

Conclusão

A utilização da casca de acerola mostrou-se tecnicamente viável para a elaboração de uma bebida fermentada tipo espumante, demonstrando o potencial de valorização desse subproduto agroindustrial. O produto final apresentou pH de 3,25 ± 0,01, teor alcoólico estimado de 8,11% (v/v) e acidez volátil de 0,67 ± 0,29 meq L^{-1}, valor abaixo do limite máximo estabelecido pela legislação brasileira. A redução dos sólidos solúveis totais de 7,84 ± 0,02 para 5,18 ± 0,03 °Brix, associada ao aumento do teor alcoólico entre o fermentado base e o espumante, indica a ocorrência das etapas fermentativas.

Sensorialmente, a bebida apresentou boa aceitação, com médias próximas ou superiores a 7 para cor e aspectos gerais, enquanto aroma e sabor também apresentaram avaliação positiva pelos provadores. Dessa forma, os resultados demonstram o potencial da fermentação como alternativa para agregar valor à casca de acerola e desenvolver novos produtos a partir de subprodutos agroindustriais, contribuindo para estratégias de

aproveitamento de recursos alinhadas aos princípios da economia circular e desenvolvimento sustentável (ODS).

Estudos futuros poderão aprofundar a caracterização do produto por meio da avaliação da cinética fermentativa, do perfil de compostos voláteis e da determinação de compostos bioativos, bem como da atividade antioxidante. Essas análises poderão contribuir para uma melhor compreensão das transformações decorrentes da fermentação e de sua influência sobre as características químicas, cromáticas e sensoriais da bebida, além de auxiliar na otimização do processo e na avaliação do potencial funcional do produto.

Referências

ALMARAZ-SÁNCHEZ, I.; AMARO-REYES, A.; ACOSTA-GALLEGOS, J. A.; MENDOZA-SÁNCHEZ, M. Processing agroindustry by-products for obtaining value-added products and reducing environmental impact. **Journal of Chemistry**, v. 2022, art. 3656932, 2022. DOI: 10.1155/2022/3656932.

BERTAGNOLLI, S. M. M.; BERNARDI, G.; DONADEL, J. Z.; FOGAÇA, A. O.; WAGNER, R.; PENNA, N. G. Natural sparkling guava wine: volatile and physicochemical characterization. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 9, art. e20151509, 2017. DOI: 10.1590/0103-8478cr20151509.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES EXPORTADORES DE FRUTAS E DERIVADOS (ABRAFRUTAS). Setor de fruticultura se destaca nas exportações brasileiras. 2 jul. 2024. Disponível em:https://abrafrutas.org/2024/07/setor-de-fruticultura-se-destaca-nas-exportacoes-brasileiras/. Acesso em: 27 agosto. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 34, de 29 de novembro de 2012. Estabelece a complementação dos padrões de identidade e qualidade para as bebidas fermentadas. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 30 nov. 2012. Disponível em:https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/do-30-11-2012-s1.pdf. Acesso em: 01 de agosto. 2026.

CAPANOGLU, Esra; NEMLI, Elifsu; TOMAS-BARBERAN, Francisco. Novel approaches in the valorization of agricultural wastes and their applications. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 70, p. 6787–6804, 2022. DOI: 10.1021/acs.jafc.1c07104.

DI GIANVITO, P.; ARFELLI, G.; SUZZI, G.; TOFALO, R. New trends in sparkling wine production: yeast rational selection. In: *Alcoholic Beverages*. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 347-386. DOI: 10.1016/B978-0-12-815269-0.00011-8.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA), (2022). Ciência e tecnologia tornaram o Brasil um dos maiores produtores mundiais de alimentos. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/75085849/ciencia-e-tecnologia-tornaram-o-brasil-um-dos-maiores-produtores-mundiais-de-alimentos. Acesso em: 01 de junho de 2026.

FERREIRA, A. M.; MENDES-FAIA, A. The role of yeasts and lactic acid bacteria on the metabolism of organic acids during winemaking. **Foods**, v. 9, n. 9, art. 1231, 2020. DOI: 10.3390/foods9091231.

GUERRA, C. C.; RIZZOLO, R. G.; PERISSUTTI, G. E.; SALVADOR, M. B. G.; OLIVEIRA, C. G. R. *Tecnologia para elaboração de vinhos espumantes naturais tintos pelo processo tradicional*. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2019. 20 p. (Documentos, 112).

MACÊDO, P. F. C.; LIMA, A. S. L.; FELIPE, A. T. M.; PAIVA, E. M. O.; MATSUI, K. N.; PEDRINI, M. R. S.; SALOMÃO, B. C. M. Valorização de resíduos de acerola: uma abordagem sustentável para a obtenção de compostos bioativos com propriedades antioxidantes e antimicrobianas. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 23, n. 1, art. e8838, 2025. DOI: 10.55905/oelv23n1-225.

MERLINO, V. M. et al. Is the consumer ready for innovative fruit wines? Perception and acceptability of young consumers. **Foods**, v. 10, n. 7, art. 1545, 2021. DOI: 10.3390/foods10071545.

MISKINIS, R. A. S.; NASCIMENTO, L. A.; COLUSSI, R. Bioactive compounds from acerola pomace: a review. **Food Chemistry**, v. 404, art. 134613, 2023. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134613.

PANDEY, A. K. et al. Transforming agri-food waste: innovative pathways toward a zero-waste circular economy. **Food Chemistry: X**, v. 28, art. 102604, 2025. DOI: 10.1016/j.fochx.2025.102604.

PEREIRA, L. F. A.; FIRMO, W. C. A.; FERNANDES, D. A importância do reaproveitamento de resíduos da indústria alimentícia: o caso do processamento de frutas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, art. e38111234089, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i12.34089.

REGUENGO, L. M.; SALGAÇO, M. K.; SIVIERI, K.; MAROSTICA JÚNIOR, M. R. Agro-industrial by-products: valuable sources of bioactive compounds. **Food Research International**, v. 152, art. 110871, 2022. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110871.

RIZZON, L. A. (ed. téc.). *Metodologia para análise de vinho*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 120 p.

SALAS-MILLÁN, J. Á.; AGUAYO, E.; CONESA-BUENO, A.; AZNAR, A. Revalorization of melon by-product to obtain a novel sparkling fruity-based wine. **Foods**, v. 12, n. 3, art. 491, 2023. DOI: 10.3390/foods12030491.

SANTOS, R. T. S.; BIASOTO, A. C. T.; RYBKA, A. C. P.; CASTRO, C. D. P. C.; AIDAR, S. T.; BORGES, G. S. C.; SILVA, F. L. H. Physicochemical characterization, bioactive compounds, in vitro antioxidant activity, sensory profile and consumer acceptability of fermented alcoholic beverage obtained from Caatinga passion fruit (Passiflora cincinnata Mast.). **LWT - Food Science and Technology**, v. 148, art. 111714, 2021. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111714.

SAUD, S.; XIAOJUAN, T.; FAHAD, S. The consequences of fermentation metabolism on the qualitative qualities and biological activity of fermented fruit and vegetable juices. **Food Chemistry: X**, v. 21, art. 101209, 2024. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101209.

SEGTOWICK, E. C. S.; BRUNELLI, L. T.; VENTURINI FILHO, W. G. Avaliação físico-química e sensorial de fermentado de acerola. Brazilian Journal of **Food Technology**, Campinas, v. 16, n. 2, p. 147-154, 2013. DOI: 10.1590/S1981-67232013005000015.

SILVEIRA, R. D.; TORRES, L. H. P. S.; HERNANDES, K. C.; SANTOS, R. T. dos S. e; DANTAS, B. F.; BIASOTO, A. C. T.; ZINI, C. A.; WELKE, J. E. Instrumental and sensory tools to evaluate the production potential of a new type of sparkling wine from umbu (Spondias tuberosa). **Food Bioscience**, v. 60, art. 104358, 2024. DOI: 10.1016/j.fbio.2024.104358.

SPEDDING, G. Alcohol and its measurement. In: BAMFORTH, C. W. (ed.). *Brewing Materials and Processes: a Practical Approach to Beer Excellence*. Amsterdam: Elsevier, 2016. cap. 7, p. 123-149. DOI: 10.1016/B978-0-12-799954-8.00007-1.

TORRESI, S.; FRANGIPANE, M. T.; ANELLI, G. Biotechnologies in sparkling wine production: interesting approaches for quality improvement - a review. **Food Chemistry**, v. 129, p. 1232-1241, 2011. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.05.006.

VENDRAMINI, A. L.; TRUGO, L. C. Chemical composition of acerola fruit (Malpighia punicifolia L.) at three stages of maturity. **Food Chemistry**, v. 71, p. 195-198, 2000.

VILVERT, J. C.; FREITAS, S. T.; VELOSO, C. M.; AMARAL, C. L. F. Genetic diversity on acerola quality: a systematic review. Brazilian Archives of Biology and Technology, v. 67, art. e24220490, 2024. DOI: 10.1590/1678-4324-2024220490.

WANG, Z.; SVYANTEK, A.; MILLER, Z. Apple and grape waste pomace fermentation and co-ferment product chemistry. **Fermentation**, v. 11, n. 3, art. 126, 2025. DOI: 10.3390/fermentation11030126.

YANG, S.; PARK, S.; KIM, I. Raw material diversification, fermentation technologies, yeast strategies, and metabolomics in non-grape fruit sparkling wines (2015-2025). **Applied Sciences**, v. 16, n. 9, art. 4357, 2026. DOI: 10.3390/app16094357.

YU, C.; LIU, Y.; NA, Y.; WU, X. Chemical and flavour dynamics in Cyperus esculentus L. pomace-raspberry composite fruit wine fermentation: a combined UHPLC-OE-MS and HS-SPME-GC-MS approach. **Food Chemistry: X**, v. 32, art. 103234, 2025. DOI: 10.1016/j.fochx.2025.103234.

ZHOU, Y.; CHEN, B.; SUN, C.; FENG, H.; WANG, X.; WANG, Y.; GUO, Y.; ZHANG, J.; WU, X.; CHEN, Y. Frozen low-temperature maceration and hot maceration fermentation: effective strategies for enhancing color stability and flavor quality of strawberry wine. **Food Chemistry**, v. 525, pt. 2, art. 150453, 2026. DOI: 10.1016/j.foodchem.2026.150453.

ZOU, W.; YUN, Y.; ZHOU, L. Quality formation mechanism of pomegranate (Punica granatum L.) franalysis of color, volatiles and phenolics. **Food Chemistry**, v. 493, pt. 2, art. 145827, 2025. DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.145827.

Anexos



Figura 1: Processo ilustrativo da fabricação da bebida fermentada do tipo espumante a partir de resíduo de casca de acerola. Fonte: Próprio autor desenvolvido com auxílio do suporte da ferramenta Chat GPT (GPT-5).



Figura 2: Primeira Fermentação do resíduo de acerola para obtenção do fermentado base. Fonte: autor (2026).



Figura 3: Garrafas de fermentado-base de acerola envasadas para a segunda fermentação. Fonte: autor (2026).



Figura 4. Alterações visuais na coloração ao longo da elaboração do espumante de resíduo de acerola: mosto (à esquerda), fermentado base após a fermentação alcoólica (ao centro) e espumante após a segunda fermentação (à direita). Fonte: Autor (2026).



Tabela 1 Caracterização físico-química

CÓDIGO: ET0515

AUTOR: JOYCE FRANCIS SOARES DOS SANTOS

ORIENTADOR: ADELARDO ADELINO DANTAS DE MEDEIROS

TÍTULO: IMPACTO DE OFICINAS PEDAGÓGICAS EM STEAM E INFORMÁTICA PARA MENINAS DA REDE PÚBLICA.

Resumo

A disparidade de gênero em STEAM decorre de estereótipos sociais que afastam mulheres da área técnica. Na UFRN, alunas representam apenas 13,9% em TI/Computação, registrando queda de −11,9 pontos percentuais entre 2010 e 2025. Para mitigar essa assimetria, uma intervenção pedagógica realizada de outubro de 2025 a agosto de 2026 promoveu oficinas semanais para estudantes de escolas públicas de Natal/RN. A metodologia ativa e interdisciplinar integrou programação em Python, desenvolvimento web, eletrônica com Arduino, química aplicada e engenharia têxtil. O percurso abrangeu introdução teórica, prática guiada, prototipagem iterativa e discussões coletivas, utilizando trabalho em equipe, analogias cotidianas e avaliações gamificadas. Como resultados, o uso do Google Colab eliminou barreiras de instalação, assegurando que 100% das alunas criassem os códigos de Python propostos. A montagem física de semáforos e alarmes na protoboard conectou software e hardware, enquanto jogos de perguntas integraram as alunas ativamente. Conclui-se que a fusão de teoria e laboratório estimula o aprendizado prático, desenvolvendo competências técnicas sólidas, impulsionando a autoconfiança e o empoderamento feminino frente à exclusão histórica na tecnologia.

Palavras-chave: Educação STEAM. Disparidade de gênero. Aprendizagem ativa.

TITLE: THE IMPACT OF EDUCATIONAL WORKSHOPS ON STEAM AND COMPUTER SCIENCE FOR GIRLS IN THE PUBLIC SCHOOL SYSTEM.

Abstract

Gender disparity in STEAM stems from social stereotypes that deter women from technical fields. At UFRN, female students account for only 13.9% in IT/Computer Science, dropping −11.9 percentage points between 2010 and 2025. To mitigate this gap, an educational intervention from October 2025 to August 2026 offered weekly workshops for public school students in Natal/RN. The active methodology integrated

Python programming, web development, Arduino electronics, applied chemistry, and textile engineering through theoretical introduction, guided practice, iterative prototyping, and group discussions. Results show that Google Colab eliminated installation barriers, enabling 100% of students to complete the Python tasks. Physical assembly of traffic lights and alarms on breadboards connected software and hardware, while quiz games increased engagement. We conclude that integrating theory and hands-on lab work stimulates practical learning, building technical skills, boosting self-confidence, and promoting women's empowerment against historical exclusion from technology.

Keywords: STEAM Education. Gender Disparity. Active Learning.

Introdução

A disparidade de gênero nos campos da Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática (STEAM) constitui uma problemática amplamente documentada na literatura educacional e socioeconômica global. Esta realidade está diretamente ligada a estereótipos sociais e culturais que associam o conhecimento técnico ao universo masculino a e a área das humanidades ao feminino (SANTOS et al., 2019 apud MANLIA, 2025). Dessa maneira, as barreiras culturais e a escassez de incentivos práticos nas etapas iniciais da formação acadêmica acabam afastando jovens mulheres de carreiras científicas e tecnológicas, limitando a consolidação de uma ciência mais plural e invisibilizando o potencial feminino de inovação e liderança.

Essa lacuna reflete-se não apenas no mercado de trabalho de tecnologia da informação e engenharias, mas também na produção acadêmica. Prova disso é o resultado do estudo sobre IMD, DCA e DIMAP (2010–2025), o qual revela que mulheres representam apenas 13,9% do corpo discente e 20,5% do corpo docente em TI/Computação na UFRN, com tendência negativa de −11,9 pontos percentuais na participação feminina entre 2010 e 2025 (BARBOSA, 2025).

Para combater essa assimetria, intervenções pedagógicas focadas na metodologia STEAM têm se mostrado instrumentos fundamentais para engajar alunas do ensino médio por meio de atividades que buscam resolução participativa de problemas reais, como evidenciado em um estudo com 60 alunas do 7º ano de uma escola pública na Turquia, o qual mostrou que atividades interdisciplinares de robótica com integração STEAM elevaram significativamente a autoeficácia em programação e em pensamento computacional, indicando que pedagogias STEAM inclusivas aumentam a confiança de meninas em áreas tradicionalmente masculinas. (ALTIN, 2025).

No contexto da rede pública de ensino do Estado do Rio Grande do Norte, especialmente no município de Natal, observa-se a necessidade urgente de complementação curricular em ferramentas computacionais e tecnológicas avançadas, pois, há desafios que impedem o desenvolvimento da implementação do STEAM, tais como a formação de professores e a falta de

estrutura nas escolas (SOARES, 2025). Esse acesso restritos a laboratórios equipados e a capacitação orientada em linguagem de programação, robótica e eletrônica ainda em diversas instituições de ensino médio reduz as oportunidades de jovens estudantes explorarem habilidades analíticas essenciais para o século XXI, como o raciocínio lógico, a modelagem automatizada e o pensamento computacional.

Nesse cenário, o projeto executado entre outubro de 2025 e agosto de 2026 propôs uma trilha formativa contínua no formato de oficinas semanais direcionadas a alunas do ensino médio da rede pública. O programa foi desenhado com uma estrutura curricular interdisciplinar, combinando áreas fundamentais de exatas e engenharias — tais como engenharia têxtil, química aplicada, programação em Python, desenvolvimento web front-end e eletrônica com arduino. O objetivo foi avaliar de que modo a experimentação prática influencia o aprendizado teórico, a motivação acadêmica e a permanência das alunas no ambiente tecnológico.

Assim, este trabalho apresenta os resultados e discussões decorrentes da aplicação dessa metodologia pedagógica ao longo de onze meses de acompanhamento. Busca-se evidenciar o potencial transformador de oficinas práticas como ferramentas de inclusão tecnológica, analisando o alcance de estudantes provenientes de múltiplas escolas estaduais, os índices de participação e a eficácia das atividades aplicadas na consolidação do aprendizado em STEAM.

Metodologia

O estudo foi desenvolvido a partir de uma abordagem educacional, articulada por meio de oficinas pedagógicas semanais ministradas na cidade de Natal/RN. A população-alvo foi constituída por estudantes do ensino público matriculadas regularmente. As participantes foram recrutadas após o cadastro em um formulário on-line, no qual havia a coleta de dados para contato, tais como e-mail e telefone, além de informações referentes a interações prévias com a área STEAM. Cabe ressaltar que a concessão das bolsas de estudo esteve vinculada a um processo seletivo eliminatório, operacionalizado conjuntamente com a professora responsável na escola parceira, assegurando a alocação adequada das vagas. Foram atendidas durante esse estudo, da rede pública de ensino da cidade de Natal, as seguintes instituições: a E.E Raimundo Soares, E.E Professor Edgar Barbosa, E.E Lourdes Guilherme, E.E Desembargador Floriano Cavalcanti, E.E Berilo Wanderley, E.E Raimundo Soares, E.E Professor Francisco Ivo Cavalcanti, E.E União do Povo de Cidade Nova, Judith Bezerra de Melo, CEEP Professora Lourdinha Guerra, IERN e IFRN CNAT.

Para a execução das oficinas técnicas e experimentais, utilizaram-se diversos recursos didáticos e infraestrutura. Para as oficinas de Eletrônica e Robótica, foram utilizados placas microcontroladoras Arduino Uno, protoboards, LEDs, resistores de diversos valores ôhmicos, potenciômetros rotativos, botões de

pressão (push buttons), emissores sonoros (buzzers) e sensores de luminosidade LDR (Light Dependent Resistor). Quanto às oficinas de Programação e Desenvolvimento Web, fez-se uso de ambientes virtuais de desenvolvimento Google Colab para escrita e execução de códigos em linguagem Python; navegadores web e editores de texto para construção de documentos HTML e estilização via CSS. Ademais, sobre as oficinas de Exatas e Engenharias Aplicadas, foram empregados insumos químicos e cosméticos para manipulação de misturas e lipídeos para a produção de gloss labial; garrafas PET, cartolinas, fitas adesivas, tesouras, estiletes e balões para construção e lançamento aerodinâmico de foguetes; réguas, papéis de gramatura específica e ferramentas de corte para modelagem manual em Engenharia Têxtil;

A estrutura metodológica das oficinas do projeto MEG é fundamentada em uma abordagem ativa, prática e integradora, combinando o embasamento teórico com a aplicação experimental de conceitos de tecnologia, exatas e engenharia. A fase de recepção e introdução conceitual da oficina iniciou-se com o acolhimento das alunas e a contextualização do tema abordado, acompanhada pelo resgate e revisão de conceitos prévios essenciais para o acompanhamento da atividade. Nesse sentido, desenvolveu-se uma exposição sobre os fundamentos teóricos centrais da intervenção, contemplando princípios de física, lógica de programação e conceitos de eletrônica, estimulando a participação ativa do grupo por meio de questionamentos e reflexões. Para concluir a etapa introdutória, realizou-se a apresentação e familiarização com os materiais e recursos tecnológicos empregados, incluindo ferramentas de simulação e ambientes de desenvolvimento (como Tinkercad, VSCode e Google Colab), bem como os insumos de laboratório e componentes de prototipagem física necessários para a execução prática posterior.

O momento prático e de experimentação guiada consolidou a aplicação direta dos conteúdos planejados, variando conforme a natureza técnica de cada oficina. Nas frentes computacionais e virtuais, priorizou-se o desenvolvimento de códigos e a prototipagem em simuladores virtuais, como o Tinkercad para testes de circuitos antes da montagem na protoboard, além do uso do VSCode e Google Colab para a escrita e validação de códigos. Por sua vez, nas atividades voltadas às áreas de engenharia e química, a prática envolveu a elaboração inicial de esboços e o trabalho colaborativo na fabricação de protótipos e formulações em laboratório (a exemplo de estruturas físicas e síntese de cosméticos), promovendo o aprendizado por meio do manuseio direto de ferramentas e insumos.

Na etapa dedicada aos desafios e à prototipagem iterativa, as alunas foram engajadas em dinâmicas práticas de resolução de problemas voltadas à validação dos protótipos criados. Por meio da execução de testes funcionais e estruturais, tais como ensaios de carga, calibração de sensores e atuadores e simulações de impacto e queda, as participantes identificaram falhas e limitações nos projetos. Esse diagnóstico prático motivou ciclos sucessivos de ajustes, refinamentos e retestes dos modelos, consolidando a aprendizagem baseada em tentativa, análise e aprimoramento contínuo.

A fase de discussão, análise e encerramento caracterizou-se pela socialização dos resultados e pela reflexão crítica sobre o processo de aprendizagem. As alunas apresentaram suas produções e debateram coletivamente os desafios enfrentados, as falhas de prototipagem e as soluções encontradas, correlacionando a vivência prática ao contexto real da prática profissional em engenharia e tecnologia. Por fim, o ciclo foi finalizado com o esclarecimento de dúvidas pontuais, a consolidação dos conceitos essenciais e o encerramento formal das atividades, consolidando o espaço de trocas e o engajamento do grupo com as áreas científicas e tecnológicas.

Resultados e Discussões

A análise dos resultados das oficinas práticas revelou que o método de aprendizado ativo acelerou a compreensão de conceitos abstratos. Durante o módulo de Programação em Python, o uso do ambiente Google Colab reduziu a barreira de entrada da instalação de softwares, permitindo que 100% das alunas presentes desenvolvessem com êxito os três programas propostos (calculadora de desconto, contador e sistema de senha).

Nas oficinas de eletrônica básica, a transição da teoria de circuitos (resistência, tensão e corrente) para a montagem física na protoboard impulsionou o engajamento. A construção do circuito de semáforo e a implementação do alarme sonoro acionado por sensor de luz (LDR) permitiram às alunas relacionar o código do microcontrolador arduino com reações físicas em tempo real, consolidando a ponte entre software e hardware.

A aplicação das revisões gamificadas ("MEG Show") destacou-se como instrumento eficiente de avaliação formativa. A inclusão da competição "Passa ou Repassa" acionada por um circuito eletrônico confeccionado pelas próprias monitoras reforçou o sentimento de pertencimento e demonstrou a aplicabilidade direta das tecnologias estudadas.

Conclusão

O presente trabalho investigou o impacto da implementação de oficinas práticas em STEAM e Informática no desenvolvimento educacional de alunas do ensino público em Natal/RN. A integração contínua entre fundamentação teórica, atividades laboratoriais e metodologias gamificadas provou ser altamente eficaz para despertar o interesse acadêmico e técnico pelas ciências exatas e tecnologias.

Os resultados obtidos demonstram que as alunas desenvolveram competências técnicas concretas em programação Python, estruturação web HTML/CSS,

conceitos de química aplicada e prototipagem eletrônica com Arduino. Além do ganho cognitivo, a convivência em um ambiente estimulante e colaborativo contribuiu significativamente para o aumento da confiança individual, do empoderamento feminino e a redução da aversão histórica associada às disciplinas tecnológicas.

Referências

ALTIN, R.; YASAN AK, N. Girls in robotics programming: STEAM integration in computer science course . International Journal of Eurasia Social Sciences , [S. l.], v. 16, n. 62, p. 2307–2326, 2025. DOI: 10.70736/ijoess.2006. Disponível em: https://rrpubs.com/index.php/ijoess/article/view/2006. Acesso em: 28 aug. 2026.

BARBOSA, Jaysa Keylla Siqueira. Mulheres em TI e Computação: diagnóstico da desigualdade de gênero na UFRN. 2025. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) – Departamento de Engenharia de Computação e Automação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.

MANLIA, Rodrigues Domingos; HUO, Anfíbio Zacarias. A relevância dos programas de incentivo à participação feminina nas ciências exatas e tecnológicas (STEAM): estudo de caso do acampamento de codificação para jovens mulheres Africanas - CODING CAMP (MOÇAMBIQUE - 2023). Revista da Faculdade de Educação, [S. l.], v. 41, n. 1, p. e4125001, 2025. DOI: 10.30681/faed.v41i1.13319. Disponível em: https://periodicos.unemat.br/ppgedu/article/view/13319. Acesso em: 28 ago. 2026.

SOARES, Gualberto de Abreu; GUSMÃO, Tânia Cristina Rocha Silva; MOLL, Vicenç Font. A EDUCAÇÃO STEAM/STEM NA EDUCAÇÃO BÁSICA BRASILEIRA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA CIENTÍFICA. ARACÊ , [S. l.], v. 7, n. 9, p. e7947 , 2025. DOI: 10.56238/arev7n9-092. Disponível em: https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/7947. Acesso em: 28 ago. 2026.

CÓDIGO: ET0529

AUTOR: LAURA OLIVEIRA QUEIROGA

ORIENTADOR: EDSON NORIYUKI ITO

TÍTULO: Produção e caracterização de filmes planos de biocompósitos amido termoplástico/fibras de algodão aplicadas para embalagens flexíveis

Resumo

Amido termoplástico (TPS) é um polímero biodegradável e de baixo custo que apresenta potencial para substituir plásticos sintéticos em determinadas aplicações. Porém, apresenta limitações, como a baixa resistência mecânica e térmica e a alta susceptibilidade à umidade. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo desenvolver biocompósito polimérico de TPS à base de amido de mandioca reforçado com raspas de algodão da indústria têxtil, nas concentrações de 1%, 3%, 5% e 10%. Os materiais foram obtidos por extrusão seguida da produção de filmes planos, a fim de avaliar a influência da incorporação das fibras de algodão nas propriedades mecânicas e morfológicas da matriz.

Palavras-chave: Amido de mandioca. Raspas de algodão. Biocompósito polimérico.

TITLE: Production and characterization of thermoplastic starch/cotton fiber biocomposite films for flexible packaging applications

Abstract

Thermoplastic starch (TPS) is a low-cost, biodegradable polymer with the potential to replace synthetic plastics in certain applications. However, it has limitations, such as low mechanical and thermal resistance and high moisture susceptibility. Accordingly, this study aimed to develop a TPS polymeric biocomposite based on cassava starch reinforced with cotton scraps from the textile industry at concentrations of 1%, 3%, 5% and 10%. The materials were produced via extrusion followed by the fabrication of flat films to evaluate the influence of cotton fiber incorporation on the mechanical and morphological properties of the matrix.

Keywords: Cassava starch. Cotton linters. Polymeric biocomposite.

Introdução

Nas últimas décadas, a crescente preocupação ambiental tem impulsionado o desenvolvimento de materiais biodegradáveis a partir de fontes renováveis, visando reduzir os impactos negativos causados pelos resíduos plásticos convencionais e a dependência de polímeros derivados do petróleo [1-6]. Neste cenário, o amido se destaca como uma matéria-prima promissora por ser abundante, de baixo custo, biodegradável e capaz de originar o amido termoplástico (TPS) quando processado com plastificantes. O TPS é um material que pode ser processado por técnicas convencionais da indústria de polímeros, com potencial para substituir plásticos sintéticos em diversas aplicações [7-12].

Apesar de suas vantagens, o TPS apresenta limitações importantes, como baixa resistência mecânica e térmica, além de elevada susceptibilidade à umidade [14-16]. Para contornar essas limitações, a incorporação de fibras naturais tem se mostrado uma alternativa eficaz, promovendo melhorias nas propriedades estruturais e de barreira do material. Entre essas fibras, o algodão se destaca por sua alta concentração de celulose e ampla disponibilidade, o que torna uma opção interessante tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental [17-22].

Diversos estudos [18, 19, 23] demonstram que fibras ricas em celulose, como as de algodão, podem atuar como reforço em matriz de TPS na produção de biocompósitos poliméricos, promovendo aumentos na cristalinidade, estabilidade térmica e na resistência à absorção de umidade. Além disso, a presença de grupos hidroxila no amido e na celulose presente nas fibras favorece a ocorrência de interações intermoleculares que potencializam o desempenho do biocompósito polimérico produzido [17, 19-23].

As fibras de algodão possuem características de grande interesse científico e industrial, sendo amplamente utilizadas como matéria-prima na indústria têxtil devido à sua elevada composição de celulose, que varia entre 85% e 97%, além de conter pequenas quantidades de hemicelulose, lignina, pectina, proteínas, cinzas e lipídios [24–25]. Estudos recentes têm explorado seu potencial como reforço em materiais biodegradáveis; Bergel et al. [26] demonstraram que a adição de fibras e microfibras de algodão em espumas de amido de batata melhora significativamente as propriedades mecânicas, especialmente nas concentrações de 2,00% e 3,33%. De forma semelhante, Prachayawarakorn et al. [27] verificaram que o uso de fibras de algodão em biocompósitos poliméricos de amido de arroz promoveu maior resistência mecânica, redução na absorção de água e melhor estabilidade térmica, com desempenho ideal em formulações contendo 10% de fibras com 2 mm de comprimento.

Neste trabalho, as fibras naturais utilizadas como reforço são as raspas de algodão provenientes da indústria têxtil, um resíduo sólido gerado em grandes volumes durante o processo produtivo de tecidos têxteis. A valorização deste resíduo como insumo para a produção de biocompósitos poliméricos representa uma estratégia de economia circular que contribui não apenas para a redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado destes resíduos, mas também para o desenvolvimento de materiais sustentáveis.

Diante deste contexto, este projeto tem como objetivo avaliar as propriedades morfológicas e mecânicas de biocompósitos poliméricos à base de amido

termoplástico (TPS) reforçados com raspas de algodão (RPA), processados por extrusão na forma de filmes planos. A escolha desta técnica se justifica por sua ampla aplicação na indústria de embalagens flexíveis, o que possibilita avaliar a aplicabilidade desses materiais como uma alternativa viável e ambientalmente sustentável aos filmes plásticos de origem fóssil. O projeto envolve o preparo das raspas, a formulação das misturas e a caracterização dos filmes a partir da realização das análises de dureza Shore D e de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Metodologia

2.1 Materiais

Neste projeto foram utilizados o amido de mandioca comercial da Yoki Alimentos S/A, glicerol PA da ISOFAR Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda com grau de pureza de 99,5%, água destilada e raspas de algodão oriundas da indústria têxtil do Rio Grande do Norte, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Materiais utilizados na produção do amido termoplástico: a) raspas de algodão; b) polvilho doce; c) glicerina.

Fonte: Elaborado pela autora

2.2 Métodos

2.2.1 Pré-mistura dos componentes

Inicialmente, misturas de glicerol e água foram preparadas e produzidas em um agitador/dispersor mecânico MA 147 de Marconi Equipamentos Para Laboratórios Ltda. As misturas de amido e de diferentes concentrações de raspas de algodão (RPA) foram produzidas em uma misturador orbital Cadence BAT508 durante 1 minuto com o acessório batedor raquete e, em seguida, 2 minutos com o acessório batedor de arame com o objetivo de dispersar de forma homogênea todos os componentes. Posteriormente, a mistura de glicerol e água foi adicionada gradualmente à batedeira, sendo incorporada aos demais materiais por 3 a 5 minutos utilizando o batedor de raquete, adequado para misturas de maior consistência. Em seguida, utilizou-se o batedor de arame por um período entre 1 e 4 minutos, a fim de promover maior integração e homogeneização da massa. Esses períodos de mistura variaram em virtude das concentrações de raspas de algodão, nas quais são proporcionais à rigidez dos biocompósitos poliméricos. Os instrumentos e equipamentos utilizados na pré-mistura do TPS com raspas de algodão estão ilustrados na Figura 2 a seguir.

Figura 2 - Imagens dos instrumentos na pré-mistura: a) Batedor de arame, b) Batedor de raquete, c) Misturador orbital, d) Agitador mecânico.

Fonte: Elaborado pela autora

A proporção de cada componente nas formulações está disponível na Tabela 1.

Tabela 1 - Formulações utilizadas para produção dos biocompósitos poliméricos

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 2 apresenta as quantidades de biocompósitos poliméricos produzidos e suas respectivas massas. Ao todo, foram obtidas oito amostras, totalizando 6,598 kg de material.

Tabela 2 - Massas dos TPS/RPA

Fonte: Elaborado pela autora

2.2.2 Mistura em extrusora de rosca dupla

Os biocompósitos poliméricos foram obtidos por meio da mistura em extrusora dupla rosca co-rotacional da empresa AX Plásticos Máquinas Técnicas, modelo AX – DR 16:40, com diâmetro de 16 mm de rosca, razão de aspecto (L/D) igual a 40 e possui 8 zonas de aquecimento do funil de alimentação até a matriz (tipo furo). O Perfil de temperatura utilizado foi de 50/60/110/110/120/120/125/130 °C e rotação da rosca de 180 rpm. Os materiais obtidos foram granulados, identificados e armazenados para as etapas seguintes. A Figura 3 apresenta as etapas ocorridas na mistura desde a alimentação da extrusora até o armazenamento dos biocompósitos poliméricos.

Figura 3 - Etapas do processamento: a) Material antes do processamento; b) TPS/RPA sendo colocado na extrusora; c) Material processado; d) Produto passando no puxador; e) TPS/RPA sendo triturado; f) material triturado e armazenado.

Fonte: Elaborado pela autora

2.2.3 Medidas de índice de fluidez (MFI)

As medidas de índice de fluidez do TPS com raspas de algodão foram realizadas em um Plastômetro da Ceast Melt Flow, Modular Line (Figura 4), na temperatura de 170ºC e o peso utilizado foi de 5 kg.

Figura 4 - Plastômetro da CEAST

Fonte: Elaborado pela autora

2.2.4 Extrusão de filmes planos

Os granulados obtidos após a mistura em extrusora dupla rosca foram processados em uma extrusora rosca simples da AX Plásticos Máquinas Técnicas modelo AX 16 que apresenta rosca com diâmetro de 16 mm, relação diâmetro por comprimento (L/D) igual a 26 e possui 3 zonas de aquecimento na temperatura de 130ºC do funil de alimentação até a matriz (tipo fita), como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Processamento do filme plano

Fonte: Elaborado pela autora

2.2.5 Produção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados a partir do material no formato de fita (Figura 6). Para a conformação das amostras, utilizou-se um molde metálico com geometria específica, como ilustrado na Figura 7, no qual o material foi posicionado manualmente, preenchendo a cavidade correspondente ao formato do corpo de prova tipo 5. As dimensões dos corpos de prova seguiram o padrão estabelecido pela norma ASTM D638.

Figura 6 - Corpos de prova: a) TPS Puro; b) TPS/RPA 1%; c) TPS/RPA 3%; d) TPS/RPA 5%; e) TPS/RPA 10%.

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 7 - Molde utilizado para corpo de prova

Fonte: Elaborado pela autora

2.2.6 Ensaio de dureza Shore D

A dureza dos materiais foi avaliada com base nos parâmetros estabelecidos pela norma ASTM D2240, sendo os resultados expressos na escala Shore D. As medições foram realizadas em um durômetro Mainard, modelo M-903, com a aplicação de uma carga de 5 kg mantida por um período de 3 segundos e, em cada amostra, foram coletados valores em cinco pontos distintos, como apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Durômetro Shore D

Fonte: Elaborado pela autora

2.2.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os corpos de provas de TPS puro e TPS com raspas de algodão foram crio-fraturados em nitrogênio líquido e analisados em microscópio eletrônico de varredura (MEV) de Bancada da HITACHI, modelo TM 3000, e em MEV de duplo feixe da ZEISS, Auriga 40, equipado com uma coluna de emissão de campo e uma coluna de íon focalizados, que estão ilustrados na Figura 9.

Figura 9 - Imagem dos MEV: a) HITACHI modelo TM 3000; b) Zeiss Auriga 40.

Fonte: Elaborado pela autora

Resultados e Discussões

3.1 Medidas de índice de fluidez (MFI)

Os resultados obtidos para as medidas de índice de fluidez podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados do MFI

Fonte: Elaborado pela autora

Observou-se um aumento no índice de fluidez (MFI) do TPS puro para o compósito contendo 5% de raspas de algodão, comportamento diferente do relatado por Shah et al. [28] que verificaram redução do MFI conforme o aumento da concentração de fibras. Essa diferença pode estar associada às condições de processamento, à interação entre as fibras e a matriz de TPS, bem como às condições de dispersão das fibras. Entretanto, para a concentração de 10% de algodão, houve redução do MFI de 14,262 g/10 min para 4,578 g/10 min. Esse comportamento pode ser atribuído ao maior teor de fibras, que aumenta a viscosidade do sistema, restringe a mobilidade da matriz e favorece a formação de aglomerados ou de uma estrutura mais rígida. Dessa forma, o efeito da incorporação das raspas de algodão não foi linear,sendo a concentração de 5% aquela que apresentou o maior valor de MFI.

3.2 Dureza Shore D

Os resultados da análise de dureza Shore D estão representados no Gráfico 1 na unidade de Shore D, em que nota-se um aumento significativo de dureza do TPS puro até o TPS com 10% de raspas de algodão devido ao possível aumento na densidade do TPS decorrente da incorporação de fibras [29], com exceção também de uma redução de dureza do TPS com 3% para o TPS com 5%, o que pode ser atribuído à heterogeneidade estrutural local e à interação das fibras com o TPS [30].

Gráfico 1 - Dureza Shore D de todas as formulações

Fonte: Elaborado pela autora

3.3 Dados da análise do MEV

A Figura 10 apresenta os resultados obtidos em microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos biocompósitos poliméricos produzidos. As micrografias evidenciam que o TPS Puro apresenta espaços e poros, características intrínsecas e à formação de bolhas decorrentes da umidade residual das etapas de processamento. Além disso, com o aumento da concentração de raspas de algodão no TPS, percebe-se que passam a ocupar gradualmente as regiões entre os espaços, sem a presença de vazios perceptíveis na interface entre o reforço e a matriz. Esse comportamento sugere uma boa adesão interfacial entre o TPS e as raspas de algodão, indicando adequada interação entre os constituintes do biocompósito polimérico.

Figura 10 - MEV do TPS com raspas de algodão: a) TPS Puro; b) TPS/RPA 1%; c) TPS/RPA 3%; d) TPS/RPA 5%; e) TPS/RPA 10%

Fonte: Elaborado pela autora

Essas observações são similares aos resultados de Freitas [31], que verificou boa compatibilidade e homogeneização entre a matriz de amido termoplástico e as microfibras de celulose. Assim, mesmo no TPS/RPA 10%, que apresenta o maior teor de reforço de algodão, observa-se distribuição homogênea do reforço, não havendo aglomerações. Porém, o aumento da concentração de fibras restringe a mobilidade das cadeias poliméricas e reduz o índice de fluidez.

Conclusão

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que o reforço de raspas de algodão à matriz de amido termoplástico (TPS) influenciou significativamente as propriedades mecânicas e morfológicas do material. As análises realizadas evidenciaram boa dispersão das raspas de algodão na matriz polimérica, sem indícios de aglomeração, indicando adequada interação interfacial entre os constituintes.

A relevância destes resultados está associada à demonstração do potencial da incorporação de raspas de algodão em matrizes de TPS, como uma estratégia para o desenvolvimento de produtos biodegradáveis. Além disso, evidencia a viabilidade do aproveitamento de resíduos da indústria têxtil na produção de biocompósitos poliméricos, agregando valor a esse resíduo. Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se o reprocessamento do TPS/RPA 10%, devido à análise do MFI apresentar um resultado diferente do comportamento e a realização de análises complementares, incluindo caracterizações térmicas, físicas e de absorção de água, com o objetivo de compreender o comportamento do material e identificar aplicações para o material desenvolvido.

Portanto, o processamento desse biocompósito polimérico representa não apenas um avanço científico, mas também um progresso inovador e econômico em conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), principalmente o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ao proporcionar mudanças benéficas socialmente e ambientalmente a partir do desenvolvimento de novos materiais no ramo industrial, o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), ao estimular rotas e meios de consumo e produção responsáveis e eficientes desde o uso das matérias-primas até o produto final.

Referências

[1] Yang, Na, Feixue Zou, Haiteng Tao, Li Guo, Bo Cui, Yishan Fang, Lu Lu, et al. 2023. “Effects of Primary, Secondary and Tertiary Structures on Functional Properties of Thermoplastic Starch Biopolymer Blend Films.” International Journal of Biological Macromolecules 236 (May): 124006–6.

[2] Rozanna Dewi, Novi Sylvia, None Zulnazri, and Medyan Riza. 2023. “Melt Flow Index (MFI) Analysis of Sago Based Thermoplastic Starch Blend with Polypropylene and Polyethylene,” April.

[3] Zhang, Jinyu, Feixue Zou, Haiteng Tao, Wei Gao, Li Guo, Bo Cui, Chao Yuan, et al. 2023. “Effects of Different Sources of Cellulose on Mechanical and Barrier Properties of Thermoplastic Sweet Potato Starch Films.” Industrial Crops and Products 194 (April): 116358–58.

[4] Peequeur, Jonas, Pierre Marcel, Laurent Libog, Téclaire Ngoup, Michel Mbere Taoga, and Fabien Betené Ebanda. 2023. “State of Knowledge on Starch as an Alternative Solution to Petrochemical Resources—a Review.” Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 11 (02): 49–62.

[5] Araya Kodsangma, Nanthicha Thajai, Winita Punyodom, Patnarin Worajittiphon, Pensak Jantrawut, Warintorn Ruksiriwanich, Sarana Rose Sommano, et al. 2023. “Mechanical Properties and Water Resistance Improvement of Thermoplastic Modified Starch, Carboxymethyl Cellulose, and Zinc Oxide Nanometal Particles by Reactive Blending.” International Journal of Biological Macromolecules 253 (December): 126783–83.

[6] Tian, Yifan, Qiao Lei, Fuxin Yang, Jing Xie, and Chenwei Chen. 2024. “Development of Cinnamon Essential Oil-Loaded PBAT/Thermoplastic Starch Active Packaging Films with Different Release Behavior and Antimicrobial Activity.” International Journal of Biological Macromolecules 263 (April): 130048.

[7] Rana, Lata, Saffana Kouka, Veronika Gajdosova, Beata Strachota, Magdalena Konefał, Vaclav Pokorny, Ewa Pavlova, et al. 2024. “Thermoplastic Starch with Maltodextrin: Preparation, Morphology, Rheology, and Mechanical Properties.” Materials 17 (22): 5474–74.

[8] Dang, Khanh Minh, and Rangrong Yoksan. 2021. “Thermoplastic Starch Blown Films with Improved Mechanical and Barrier Properties.” International Journal of Biological Macromolecules 188 (October): 290–99.

[9] J. Lopes, I. Gonçalves, C. Nunes, B. Teixeira, R. Mendes, P. Ferreira, M. A. Coimbra, Potato peel phenolics as additives for developing active starch-based films with potential to pack smoked fish fillets, Food Packaging and Shelf Life, V. 28, 2021,100644,

[10] F. Versino, O.V. Lopez, M.A. Garcia, N.E. Zaritzky Starch-based films and food coatings: An overview Starch/Staerke, 68 (11–12) (2016), pp. 1026-1037

[11] MONTILLA-BUITRAGO, C. E. et al. Effect of Plasticizers on Properties, Retrogradation, and Processing of Extrusion-Obtained Thermoplastic Starch: A Review. Starch - Stärke, v. 73, n. 9-10, p. 2100060, 16 maio 2021.

[12] Chen, Jie, Xia Wang, Zhu Long, Shuangfei Wang, Jingxian Zhang, and Lei Wang. 2020. “Preparation and Performance of Thermoplastic Starch and Microcrystalline Cellulose for Packaging Composites: Extrusion and Hot Pressing.” International Journal of Biological Macromolecules 165 (December): 2295–2302.

[13] Giuri, A.; Colella, S.; Listorti, A.; Rizzo, A.; Esposito Corcione, C. Biodegradable extruded thermoplastic maize starch for outdoor applications. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 134, n. 1, p. 549–558, 2018.

[14] Alves, A. C. L. Blendas de amido termoplástico e poli (álcool vinílico-co-etileno). Universidade Federal de São Carlos, 2018.

[15] Reis, M. M. S.; Santos, Z. I. G.; Ueki, M. M.; Brito, G. F. Avaliação do Tipo de Plastificante nas Propriedades de Blendas de Polietileno / Amido Termoplástico. Remap, v. 11, n. 3, p. 130–135, 2016.

[16] Mohammadi Nafchi, A., Moradpour, M., Saeidi, M., Alias, A. K., Thermoplastic starches: Properties, challenges, and prospects. Starch/Starke € 2013, 65, 61–72.

[17] Xiaofei Ma, Jiugao Yu, John F. Kennedy, Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites, Carbohydrate Polymers, Volume 62, Issue 1, 2005, Pages 19-24,

[18] Mailson de Vilhena, Rochelle Matos, Gilberto Ramos Junior, Bruno Viegas, Carlos, Emanuel Macedo, Marcos Paula, Silva Souza, Verônica Candido, and Edinaldo de. 2023. “Influence of Glycerol and SISAL Microfiber Contents on the Thermal and Tensile Properties of Thermoplastic Starch Composites.” Polymers 15 (20): 4141–41.

[19] Tanpichai, Supachok, Kasidit Thongdonson, and Anyaporn Boonmahitthisud. 2023. “Enhancement of the Mechanical Properties and Water Barrier Properties of Thermoplastic Starch Nanocomposite Films by Chitin Nanofibers: Biodegradable Coating for Extending Banana Shelf Life.” Journal of Materials Research and Technology 26 (September): 5617–25.

[20] Lucía Famá, Lía Gerschenson, Silvia Goyanes, Starch-vegetable fibre composites to protect food products, Carbohydrate Polymers, Volume 75, Issue 2, 2009, Pages 230-235,

[21]Cataño, Francisco A, Viviana Moreno-Serna, Alejandro Cament, Carlos Loyo, Mauricio Yáñez-S, J Andrés Ortiz, and Paula A Zapata. 2023. “Green Composites Based on Thermoplastic Starch Reinforced with Micro- and Nano-Cellulose by Melt Blending - a Review.” International Journal of Biological Macromolecules 248 (July): 125939–39.

[22] J. Prachayawarakorn, P. Sangnitidej, P. Boonpasith, Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by cotton fiber or low-density polyethylene, Carbohydrate Polymers, Volume 81, Issue 2, 2010, Pages 425-433

[23] U. Funke, W. Bergthaller, M.G. Lindhauer, Processing and characterization of biodegradable products based on starch, Polymer Degradation and Stability, Volume 59, Issues 1–3, 1998, Pages 293-296.

[24] Rafael Garcia Candido, In The Textile Institute Book Series, Fundamentals of Natural Fibres and Textiles, Woodhead Publishing, 2021, Pages 599-624

[25] SILVA, L. F. et al.. Cotton incorporated Poly(lactic acid)/thermoplastic Starch Based Composites Used as Flexible Packing for Short Shelf Life Products. Materials Research, v. 27, p. e20230366, 2024.

[26] Bruno Felipe Bergel, Ludmila Leite Araujo, Ruth Marlene Campomanes Santana, Effects of the addition of cotton fibers and cotton microfibers on the structure and mechanical properties of starch foams made from potato starch, Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, Volume 2, 2021, 100167,

[27] Prachayawarakorn, J., Ruttanabus, P. & Boonsom, P. Effect of Cotton Fiber Contents and Lengths on Properties of Thermoplastic Starch Composites Prepared from Rice and Waxy Rice Starches. J Polym Environ 19, 274–282 (2011).

[28] SHAH, Pathik; PRAJAPATI, Rataram; SINGH, Puja. Enrichment of Mechanical Properties of Biodegradable Composites Containing Waste Cellulose Fiber and Thermoplastic Starch. European Journal of Advances in Engineering and Technology, v. 4, n. 4, p. 282–286, 2017.

[29] MUNAR, Andrés Mauricio; TRUJILLO, Danilo Bonilla; MÉNDEZ, Nelly María; MESA, Carlos Guillermo; TENORIO, Paola Andrea; MONTEALEGRE-TORRES, Francisco; ZAPATA-DÍAZ, Yean Carlos; OSPINA-AGUILAR, Lina Gisselth; CASTAÑEDA-NIÑO, Juan Pablo. Influence of core starch and lignocellulosic fibers from plantain (Musa paradisiaca L.) pseudostem on the development of thermoplastic starches and biobased composite materials. Polymers, v. 17, n. 7, art. 859, 2025. DOI: 10.3390/polym17070859.

[30] FABIJAŃSKI, Mariusz; GARBARSKI, Jacek. The influence of Cellulose Fiber Content on the Mechanical Properties of Composites Based on Modified Thermoplastic Starch. Processes, v. 14, n. 9, art. 1480, 2026. DOI: 10.3390/pr14091480.

[31] FREITAS, Pedro A. V.; ARIAS, Carla I. La Fuente; TORRES-GINER, Sergio; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, Chelo; CHIRALT, Amparo. Valorization of Rice Straw into Cellulose Microfibers for the Reinforcement of Thermoplastic Corn Starch Films. Applied Sciences, v. 11, n. 18, art. 8433, 2021. DOI: 10.3390/app11188433.

Anexos



Figura 1 - Materiais utilizados na produção do amido termoplástico: a) raspas de algodão; b) polvilho doce; c) glicerina.



Figura 2 - Imagens dos instrumentos na pré-mistura: a) Batedor de arame, b) Batedor de raquete, c) Misturador orbital, d) Agitador mecânico.



Tabela 1 - Formulações utilizadas para produção dos biocompósitos poliméricos



Tabela 2 - Massas dos TPS/RPA



Figura 3 - Etapas do processamento: a) Material antes do processamento; b) TPS/RPA sendo colocado na extrusora; c) Material processado; d) Produto passando no puxador; e) TPS/RPA sendo triturado; f) material triturado e armazenado.



Figura 4 - Plastômetro da CEAST



Figura 5 - Processamento do filme plano



Figura 6 - Corpos de prova: a) TPS Puro; b) TPS/RPA 1%; c) TPS/RPA 3%; d) TPS/RPA 5%; e) TPS/RPA 10%.



Figura 7 - Molde utilizado para corpo de prova



Figura 8 - Durômetro Shore D



Figura 9 - Imagem dos MEV: a) HITACHI modelo TM 3000; b) Zeiss Auriga 40.



Tabela 3 - Resultados do MFI



Gráfico 1 - Dureza Shore D de todas as formulações



Figura 10 - MEV do TPS com raspas de algodão: a) TPS Puro; b) TPS/RPA 1%; c) TPS/RPA 3%; d) TPS/RPA 5%; e) TPS/RPA 10%

CÓDIGO: ET0537

AUTOR: MATEUS VINICIUS FIGUEREDO DE ARAUJO

ORIENTADOR: IVANOVITCH MEDEIROS DANTAS DA SILVA

TÍTULO: Exploração de Modelos de Linguagem em Dispositivos de Baixo Poder Computacional para Aplicações em Ambientes IoT

Resumo

A difusão da Internet das Coisas (IoT) vem ampliando a demanda por soluções inteligentes capazes de processar dados localmente e reduzir a dependência de serviços em nuvem. Nesse contexto, modelos de linguagem compactos podem viabilizar tarefas como interpretação de comandos e resposta a perguntas técnicas em dispositivos com recursos computacionais limitados. Este trabalho investigou a adaptação e a execução de modelos de linguagem em plataformas de computação de borda, com uso de versões quantizadas e testes em um Raspberry Pi 5 com AI HAT+ e em um NVIDIA Jetson Orin Nano. A avaliação teve caráter exploratório e considerou a viabilidade de execução local, a compatibilidade entre modelos, ferramentas e hardware, além do comportamento das respostas geradas. Os experimentos mostraram que modelos compactos e quantizados podem ser executados localmente nas plataformas avaliadas e responder de forma satisfatória a comandos e perguntas de escopo definido. Também foram observadas limitações em solicitações mais complexas e a importância do suporte de software para o aproveitamento dos recursos de hardware. Conclui-se que modelos de linguagem otimizados apresentam potencial para aplicações IoT que demandem interação em linguagem natural diretamente na borda.

Palavras-chave: Modelos de linguagem. Quantização. Edge AI. TinyML. IoT.

TITLE: Exploring Language Models on Resource-Constrained Devices for IoT Applications

Abstract

The spread of the Internet of Things (IoT) has increased the demand for intelligent solutions capable of processing data locally and reducing dependence on cloud services. In this context, compact language models may enable tasks such as command interpretation and technical question answering on devices with limited computational resources. This work investigated the adaptation and execution of language models on edge computing platforms using quantized versions and tests on a Raspberry Pi 5 with AI HAT+ and an NVIDIA Jetson Orin Nano. The evaluation followed an exploratory approach and considered the feasibility of local execution, compatibility among models,

software tools, and hardware, as well as the behavior of the generated responses. The experiments showed that compact and quantized models can run locally on the evaluated platforms and provide satisfactory responses to commands and questions with a defined scope. Limitations were also observed in more complex requests, along with the importance of software support for effective use of hardware resources. It is concluded that optimized language models have potential for IoT applications that require natural language interaction directly at the edge.

Keywords: Language models. Quantization. Edge AI. TinyML. IoT.

Introdução

A crescente digitalização de processos e a difusão da Internet das Coisas (IoT) vêm impulsionando a necessidade de soluções inteligentes que operem na borda da rede. Em vez de depender exclusivamente da conectividade com servidores remotos, os sistemas modernos demandam inteligência embarcada para processar dados e tomar decisões localmente, com baixa latência, eficiência energética e resiliência a falhas de comunicação.

Neste contexto, os modelos de linguagem natural, com destaque para os Modelos de Linguagem de Grande Porte (LLMs) e suas versões compactas, são ferramentas promissoras que permitem que dispositivos com recursos limitados desempenhem tarefas cognitivas, como interpretação de comando técnico, extração de informações e resposta a consultas. No entanto, a aplicação prática desses modelos em dispositivos de baixo poder computacional microcontroladores e processadores embarcados, impõe desafios significativos relacionados ao uso de memória, tempo de inferência e consumo de energia
Para contornar essas limitações, a literatura recente tem explorado técnicas de compressão, quantização e simplificação de modelos, aliadas aos avanços em computação de borda (edge computing) e em aprendizado de máquina embarcado (TinyML). Essas abordagens buscam reduzir o tamanho e a complexidade computacional dos modelos sem comprometer significativamente sua precisão, viabilizando a inferência local em plataformas com restrições severas de hardware, típicas de sensores, gateways e microcontroladores empregados em aplicações industriais e veiculares. Ainda assim, há questões que permanecem em aberto sobre o equilíbrio entre desempenho, consumo de recursos e qualidade das respostas quando esses modelos operam fora da nuvem.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo investigar, adaptar e avaliar o desempenho de modelos de linguagem para execução eficiente em dispositivos de baixo poder computacional, com vistas à sua aplicação em ambientes IoT. Para isso, propõe-se o estudo dos fundamentos e das técnicas de otimização desses modelos, o desenvolvimento de protótipos capazes de interpretar comandos e responder a perguntas técnicas, e a avaliação experimental desses protótipos quanto a métricas como latência, uso de memória e precisão, em ambiente simulado ou real.

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido em etapas progressivas, partindo da fundamentação teórica até a implementação e avaliação experimental das soluções propostas. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre modelos de linguagem otimizados, computação de borda (edge computing), aprendizado de máquina embarcado (TinyML) e técnicas de compressão e otimização de modelos. Para essa etapa, foram consultados artigos científicos, trabalhos de revisão e livros de referência da área. Esse levantamento permitiu compreender as principais limitações relacionadas à execução de modelos de inteligência artificial em dispositivos com recursos computacionais restritos e serviu de base para a definição das etapas experimentais.

Em seguida, foi realizado o mapeamento das plataformas embarcadas disponíveis e a definição dos critérios técnicos considerados relevantes para a seleção de modelos de linguagem adequados à execução local. Foram analisados aspectos como capacidade de memória, demanda computacional, espaço de armazenamento, compatibilidade com as ferramentas disponíveis e características gerais de execução. Esses critérios foram adotados por influenciarem diretamente a viabilidade do uso de modelos de linguagem em dispositivos empregados em aplicações de computação de borda.

Como plataformas de referência, foram utilizados: um Raspberry Pi 5 com 16 GB de memória RAM, equipado com acelerador de inteligência artificial AI HAT+, e um NVIDIA Jetson Orin Nano com 8 GB de memória. As plataformas apresentam características distintas de processamento. O Raspberry Pi utiliza uma CPU de propósito geral e pode ser associado a aceleradores dedicados para determinadas cargas de inteligência artificial, enquanto o Jetson Orin Nano dispõe de uma GPU integrada desenvolvida para esse tipo de aplicação. Essa diferença permitiu observar o comportamento dos modelos em ambientes de hardware com características distintas.

Após a definição das plataformas e dos critérios de seleção, foram escolhidos modelos de linguagem compactos adequados às condições disponíveis. Foram consideradas versões quantizadas dos modelos, técnica que reduz a precisão numérica utilizada na representação de seus parâmetros com o objetivo de diminuir a quantidade de recursos necessários para armazenamento e execução. A adoção dessa estratégia foi motivada pela necessidade de adequar os modelos às limitações das plataformas utilizadas no estudo.

Os experimentos foram conduzidos com ferramentas e frameworks compatíveis com a execução local de modelos de linguagem quantizados. Inicialmente, as configurações foram preparadas e verificadas em ambiente controlado, permitindo identificar problemas de compatibilidade e realizar os ajustes necessários antes dos testes nas plataformas selecionadas. Os procedimentos de implementação foram orientados pela documentação das ferramentas utilizadas, pelos repositórios públicos dos modelos e pelas referências consultadas durante a revisão bibliográfica.

Para verificar o funcionamento das soluções, foram utilizados comandos e perguntas técnicas previamente definidos. As mesmas solicitações foram empregadas durante os testes com o objetivo de observar o comportamento dos modelos de forma semelhante

entre as diferentes configurações. A avaliação concentrou-se principalmente na capacidade de inicialização e execução dos modelos, na geração de respostas coerentes com as solicitações apresentadas e na adequação das configurações às características das plataformas utilizadas.

A análise experimental teve caráter exploratório. Dessa forma, aspectos relacionados ao consumo de recursos, tempo de resposta e comportamento geral da execução foram observados durante os testes, porém não foi realizada uma caracterização quantitativa sistemática dessas métricas. O objetivo principal dessa etapa foi verificar a viabilidade da execução local dos modelos e identificar as condições necessárias para seu funcionamento em ambientes de computação de borda.

Por fim, os resultados foram organizados e analisados de forma comparativa e qualitativa, considerando as características observadas durante a implementação e a execução dos modelos. As observações realizadas foram confrontadas com os trabalhos consultados durante a revisão bibliográfica, permitindo discutir as possibilidades e limitações do uso de modelos de linguagem compactos e quantizados em dispositivos de borda.

Resultados e Discussões

Os experimentos realizados permitiram verificar a viabilidade da execução local de modelos de linguagem compactos nas plataformas embarcadas consideradas neste trabalho. Durante os testes, os modelos selecionados foram configurados e executados com diferentes níveis de quantização, possibilitando avaliar de forma prática sua compatibilidade com ambientes de computação de borda e com recursos computacionais mais limitados quando comparados a servidores tradicionalmente utilizados para execução de modelos de linguagem.

De maneira geral, foi possível realizar a inicialização dos modelos e a geração de respostas aos comandos e perguntas definidas para os testes. Esse resultado demonstra que a execução de modelos de linguagem em plataformas como o Raspberry Pi 5 e o NVIDIA Jetson Orin Nano é tecnicamente possível, desde que sejam utilizados modelos compatíveis com a capacidade de processamento e memória disponível, além de ferramentas adequadas para a realização da inferência.

A utilização de versões quantizadas mostrou-se especialmente importante nesse processo. A redução da precisão numérica dos parâmetros permitiu trabalhar com representações mais compactas dos modelos, facilitando sua utilização em plataformas com recursos de memória e armazenamento inferiores aos encontrados em computadores de maior capacidade. Na prática, as configurações quantizadas apresentaram maior adequação ao cenário estudado, permitindo a execução dos modelos sem a necessidade de uma infraestrutura computacional de grande porte.

Esse comportamento está de acordo com a literatura consultada, que apresenta a quantização e outras técnicas de compressão como alternativas importantes para reduzir

a complexidade computacional de modelos de inteligência artificial destinados à execução na borda. Liu et al. (2024) destacam que a redução do custo computacional é um dos principais requisitos para utilização de técnicas de aprendizado de máquina em dispositivos com recursos limitados. De forma semelhante, Zhang et al. (2025) discutem diferentes estratégias de otimização voltadas à execução eficiente de modelos em ambientes de borda.

Os testes também permitiram observar diferenças entre as plataformas avaliadas. O Raspberry Pi 5 apresentou-se como uma alternativa capaz de executar modelos compactos utilizando seus recursos computacionais disponíveis, enquanto o NVIDIA Jetson Orin Nano apresentou características de hardware especificamente voltadas para aplicações de inteligência artificial. Essas diferenças reforçam a importância de considerar não apenas o tamanho do modelo, mas também a arquitetura da plataforma e a compatibilidade entre o hardware e as ferramentas utilizadas para a inferência.

No caso do Raspberry Pi 5, a presença do acelerador AI HAT+ amplia as possibilidades de utilização da plataforma em aplicações de inteligência artificial. Entretanto, seu aproveitamento depende do suporte oferecido pelos frameworks e pelos modelos utilizados. Dessa forma, a existência de um acelerador dedicado não significa necessariamente que todas as etapas relacionadas à execução de modelos de linguagem serão processadas por esse componente. A compatibilidade entre hardware, modelo e software continua sendo um aspecto relevante para aplicações de inteligência artificial na borda.

Em relação às respostas geradas, os modelos demonstraram capacidade de interpretar comandos e produzir textos relacionados às solicitações apresentadas durante os experimentos. Para perguntas mais diretas e comandos simples, o comportamento observado foi satisfatório para os objetivos propostos neste trabalho. Isso indica que modelos compactos podem ser empregados em aplicações nas quais as tarefas são previamente delimitadas e não exigem o mesmo nível de complexidade encontrado em sistemas baseados em modelos de linguagem de maior porte.

Também foram observadas limitações inerentes ao uso de modelos menores e quantizados. Dependendo da complexidade da solicitação, as respostas podem apresentar menor nível de detalhamento, informações incompletas ou variações de qualidade. Essa característica deve ser considerada principalmente em aplicações que exigem elevado grau de precisão ou conhecimento técnico especializado. Nesse sentido, a escolha do modelo deve considerar não apenas sua capacidade de execução na plataforma, mas também a complexidade das tarefas que serão realizadas.

Os resultados obtidos reforçam, portanto, a existência de um equilíbrio entre capacidade computacional, tamanho do modelo e qualidade das respostas. Modelos maiores podem apresentar maior capacidade de geração e compreensão, porém exigem quantidade superior de memória e processamento. Em contrapartida, modelos menores e versões quantizadas apresentam maior compatibilidade com dispositivos de borda, ainda que possam existir limitações relacionadas à qualidade das respostas em tarefas mais complexas.

Essa relação entre desempenho e consumo de recursos é um dos principais desafios discutidos nos estudos relacionados ao TinyML e à inteligência artificial aplicada à

computação de borda. Elhanashi et al. (2024) apontam que a limitação de memória, processamento e consumo energético influencia diretamente a escolha dos modelos e das técnicas empregadas em dispositivos IoT. Os experimentos realizados neste trabalho apresentaram comportamento compatível com essa discussão, uma vez que a execução local exigiu a seleção de modelos e configurações adequados às características das plataformas utilizadas.

Outro aspecto relevante observado durante o desenvolvimento foi a importância das ferramentas de software utilizadas para executar os modelos. A utilização de frameworks compatíveis com modelos quantizados facilitou a configuração do ambiente e possibilitou a realização dos testes em diferentes plataformas. Dessa forma, a viabilidade da inteligência artificial embarcada não depende exclusivamente da capacidade física do dispositivo, mas também do suporte existente no ecossistema de software.

A realização dos experimentos permitiu ainda verificar uma das principais vantagens associadas à inferência local. Após o carregamento e a configuração do modelo, o processamento das solicitações pode ocorrer diretamente no dispositivo, reduzindo a dependência de serviços externos para a realização da tarefa. Essa característica é relevante para ambientes IoT nos quais a conectividade pode ser limitada ou instável e para aplicações em que a resposta local representa uma vantagem operacional.

Os resultados também apresentam relação com a discussão realizada por Oliveira et al. (2024) sobre a convergência entre sistemas embarcados, computação de borda e Internet das Coisas. O aumento da capacidade computacional dos dispositivos localizados na borda permite que uma parcela maior do processamento seja realizada próxima à origem dos dados, diminuindo a necessidade de encaminhar todas as informações para serviços de computação em nuvem. A execução dos modelos avaliados neste trabalho representa uma aplicação prática dessa tendência.

De forma geral, os experimentos atenderam ao objetivo de investigar a possibilidade de utilização de modelos de linguagem em dispositivos de computação de borda. Foi possível configurar e executar os modelos selecionados, aplicar técnicas de quantização e realizar testes de interpretação de comandos e geração de respostas nas plataformas avaliadas. Esses resultados demonstram que a utilização de modelos de linguagem compactos em ambientes embarcados é uma alternativa tecnicamente viável para aplicações específicas.

É importante destacar, entretanto, que esta etapa do trabalho teve caráter predominantemente exploratório. A avaliação concentrou-se na verificação do funcionamento dos modelos e na análise de sua adequação às plataformas disponíveis. Dessa forma, não foi realizada uma caracterização quantitativa aprofundada de aspectos como consumo energético, latência de geração, utilização de memória ou desempenho em tokens por segundo.

Essa limitação não impede a avaliação da viabilidade da solução, mas restringe comparações quantitativas entre diferentes configurações. Estudos futuros podem ampliar os experimentos por meio da coleta sistemática dessas métricas, permitindo estabelecer comparações mais detalhadas entre modelos, níveis de quantização e plataformas de hardware. Também podem ser considerados conjuntos maiores de

perguntas, métodos automatizados de avaliação da qualidade das respostas e dispositivos com restrições computacionais ainda maiores.

Assim, os resultados alcançados nesta etapa indicam que a combinação de modelos compactos, técnicas de quantização e plataformas de computação de borda apresenta potencial para o desenvolvimento de aplicações IoT capazes de interpretar comandos e gerar respostas localmente. Ao mesmo tempo, os experimentos mostram que a escolha da solução deve considerar as características do hardware, o suporte das ferramentas utilizadas e o nível de complexidade esperado para as tarefas executadas.

Conclusão

Este trabalho permitiu investigar a utilização de modelos de linguagem compactos em plataformas de computação de borda, considerando as limitações de processamento, memória e compatibilidade presentes nesse tipo de ambiente. A partir da revisão bibliográfica, da seleção de modelos, do uso de versões quantizadas e da realização de testes em um Raspberry Pi 5 e em um NVIDIA Jetson Orin Nano, foi possível verificar a viabilidade da execução local de modelos de linguagem em dispositivos com capacidade computacional inferior à encontrada em servidores e estações de alto desempenho.

Os experimentos mostraram que modelos compactos e quantizados podem ser utilizados para interpretar comandos e gerar respostas localmente, principalmente em tarefas com escopo bem definido. A quantização mostrou-se uma estratégia importante para adequar os modelos às características das plataformas utilizadas, contribuindo para tornar sua execução mais compatível com ambientes de computação de borda.

Também foi possível observar que a viabilidade de uma solução desse tipo não depende apenas das características do modelo ou da capacidade do hardware. A compatibilidade entre o modelo, o framework utilizado e os recursos de processamento disponíveis exerce influência direta sobre a implementação. Dessa forma, a escolha de uma plataforma para aplicações de inteligência artificial na borda deve considerar o conjunto formado por hardware, software e requisitos da tarefa.

Apesar dos resultados satisfatórios quanto ao funcionamento da proposta, foram identificadas limitações. Modelos compactos podem apresentar respostas menos completas em solicitações mais complexas, e a avaliação realizada neste trabalho teve caráter predominantemente exploratório, sem uma comparação quantitativa sistemática de métricas como consumo de memória, latência, velocidade de geração e consumo energético. Por esse motivo, os resultados permitem verificar a viabilidade da solução, mas não determinar de forma definitiva qual modelo, nível de quantização ou plataforma apresenta o melhor desempenho.

Como continuidade da pesquisa, recomenda-se ampliar os experimentos por meio da coleta sistemática de métricas de desempenho e consumo de recursos, além da avaliação de outros modelos, diferentes níveis de quantização e plataformas com restrições

computacionais mais severas. Também seria relevante utilizar conjuntos maiores de perguntas e critérios quantitativos para avaliar a qualidade das respostas geradas.

Conclui-se, portanto, que modelos de linguagem compactos e otimizados apresentam potencial para aplicações de Internet das Coisas que necessitem de interpretação de comandos e interação em linguagem natural diretamente na borda da rede. Os resultados obtidos estabelecem uma base para estudos posteriores voltados ao desenvolvimento de soluções mais eficientes, autônomas e adequadas às limitações de dispositivos embarcados.

Referências

1) Franklin Oliveira, Daniel G. Costa, Flávio Assis, Ivanovitch Silva, Internet of Intelligent Things: A convergence of embedded systems, edge computing and machine learning, Internet of Things, Volume 26, 2024, 101153, ISSN 2542-6605.

2) Jay Alammar, Maarten Grootendorst. Hands-On Large Language Models: Language Understanding and Generation, O'Reilly 2024.

3) A. Elhanashi, P. Dini, S. Saponara, and Q. Zheng, “Advancements in tinyml: Applications, limitations, and impact on iot devices,” Electronics, vol. 13, no. 17, p. 3562, 2024.

4) M. Gupta, A. Arora, and A. Sharma, “Tinyml-based drowsiness detection system using edge ai on resource-constrained devices,” Sensors, vol. 23, no. 12, p. 5696, 2023.

5) H.-I. Liu, M. Galindo, H. Xie, L.-K. Wong, H.-H. Shuai, Y.-H. Li, and W.-H. Cheng, “Lightweight deep learning for resource-constrained environments: A survey,” ACM Computing Surveys, vol. 56, no. 10, pp. 1–42, 2024.

6) R. Zhang, H. Jiang, W. Wang, and J. Liu, “Optimization methods, challenges, and opportunities for edge inference: A comprehensive survey,” Electronics, vol. 14, no. 7, p. 1345, 2025.

CÓDIGO: ET0552

AUTOR: EMILLY NAYARA FRAZAO XAVIER

ORIENTADOR: KATIA NICOLAU MATSUI

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE EMBALAGENS RÍGIDAS BIODEGRADÁVEIS À BASE DE FARINHA DE SEMENTE DE JACA E AMIDO DE MILHO

Resumo

Desenvolveu-se e caracterizou-se embalagens rígidas biodegradáveis a partir de uma formulação (m/m) de farinha de semente de jaca (*Artocarpus heterophyllus L.*) e amido de milho (*Zea mays L.*) via moldagem manual. A composição centesimal da farinha revelou um elevado teor de carboidratos (84,43%), baixo teor de gordura (0,79%) e proteína (0,99%), além de um teor de umidade de 5,96%, favorável à estabilidade microbiana. Nos ensaios de caracterização, a embalagem apresentou dureza superior à de bandejas de ovos comerciais, registrando médias de 82 (± 8,02) em Shore-A e 43 (± 5,77) em Shore-D. A absorção de água elevou-se progressivamente até 16% em 10 minutos devido à hidrofilia do amido e das fibras. No ensaio de biodegradação em solo, o material atingiu uma perda de massa de 88,08% em 24 dias, superando expressivamente o controle comercial (47,58%). Apesar de apresentar trincas estruturais decorrentes da moldagem manual e da alta proporção fibrosa, o compósito demonstrou excelente potencial ecológico e viabilidade tecnológica para substituição de plásticos de uso único.

Palavras-chave: Reaproveitamento, Resíduo, Fonte Amilácea, Sustentabilidade

TITLE: Development and Characterization of Rigid Biodegradable Packaging Based on Jackfruit Seed Flour and Corn Starch

Abstract

Rigid biodegradable packaging was developed and characterized using a (m/m) formulation of jackfruit seed flour (*Artocarpus heterophyllus L.*) and corn starch (*Zea mays L.*) via manual molding. Proximal analysis of the flour revealed a high carbohydrate content (84.43%), low fat (0.79%) and protein (0.99%) content, and a moisture content of 5.96%, which is favorable for microbial stability. Characterization tests showed the packaging to have greater hardness than commercial egg trays, recording mean values of 82 (± 8.02) on the Shore-A scale and 43 (± 5.77) on the Shore-D scale. Water absorption rose progressively to 16% within 10 minutes due to the

hydrophilic nature of the starch and fibers. In soil biodegradation tests, the material achieved a mass loss of 88.08% over 24 days, significantly outperforming the commercial control (47.58%). Despite exhibiting structural cracks resulting from manual molding and the high fiber content, the composite demonstrated excellent ecological potential and technological viability for replacing single-use plastics.

Keywords: Repurposing, Waste, Starch Source, Sustainability

Introdução

O descarte descontrolado de embalagens plásticas sintéticas de uso único derivadas do petróleo, como poliestireno expandido (EPS), gera severos impactos acumalitivos aos ecossistemas marinhos e terrestres devido ao longo período de degradação, estimando cerca de 500 anos (NCUBE et al., 2020). A reduzida taxa de reciclagem desses recipientes comerciais, dificulta o processo de transformação de materiais descartáveis em novos insumos e produtos (Wolter, 2024; Turner, 2020). Neste cenário, o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis obtidas através de fontes renováveis surge como uma alternativa sustentável indispensável para mitigar os impactos ambientais (Nascimento, 2024).

O amido destaca-se como matéria prima de destaque para o desenvolvimento de biocompósitos devido a sua abundância, baixo custo, biodegradabilidade e facilidade de gelatinização (Nascimento, 2024). Contudo, embalagens biodegradáveis produzidas exclusivamente a partir do amido apresentam limitações práticas expressivas, exibindo uma natureza quebradiça, alta fragilidade mecânica e instabilidade em contato com a umidade (Nascimento, 2024; Quispe-Sanchez et al., 2025; Rodrigues, 2019). Para contornar estas desvantagens, a incorporação de fibras vegetais e coprodutos agroindustriais é investigada como material de reforço mecânico (Sapuan et al.,2020; Quispe-Sanchez et al., 2025)

Diante desta perspectiva da valorização de resíduos agroindustriais, o reaproveitamento da Jaca (*Artocarpus heterophyllus L.*) apresenta elevado potencial de inovação. Sendo fruto de rápida maturação e alta perecibilidade, gera elevados índices de desperdício pós-colheita, resultando no descarte massivo de suas sementes. As sementes da jaca representam entre 15% e 25% do peso total da fruta. Quando desperdiçadas, constituem uma valiosa fonte de teores elevados de proteínas, carboidratos e lipídios nas sementes, sendo o maior componente presente, o amido, que apresenta teor acima de 92% em base seca (Miguel, 2023; Rocha, 2020).

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo desenvolver, caracterizar e avaliar a viabilidade de embalagens rígidas biodegradáveis, produzida via moldagem manual a partir da formulação da farinha da semente da jaca e amido de milho (*Zea mays L.*)na proporção (m/m). Para tanto, investigaram-se as propriedades de dureza, absorção de água e bem, sua biodegradação em solo.

Metodologia

Esta seção refere-se aos materiais, os métodos e os procedimentos utilizados para o desenvolvimento da embalagem rígida biodegradável e a caracterização das matérias-primas e do produto final deste estudo. Para a realização da pesquisa o insumo adquirido, as sementes de jaca, se deu através da empresa Delícia da Fruta localizada na cidade de Macaíba, RN, (coordenadas: 5°52'14.2"S 35°19'17.9"W), o amido de milho comercial foi adquirido no mercado local de Natal-RN e as análises foram no realizadas no Laboratório de Controle de Qualidade dentro do Complexo dos Laboratórios de Engenharia de Alimentos (CLEA) em parceria com outros laboratórios pertencentes ao mesmo complexo, e, como também ao Laboratório Institucional de Microscopia e Metrologia (LIME) e Laboratório do Grupo de Estudos de Tribologia (LabGET) pertencentes a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

A farinha de semente de jaca utilizada neste estudo foi cedida por Miguel (2023), originada do trabalho de mestrado desenvolvido no CLEA. O processamento seguiu os parâmetros metodológicos estabelecidos pela autora. Todas as análises para realização das composições centesimais da farinha de semente da jaca foram realizadas, no mínimo, em triplicata, sendo: o teor de umidade, cinzas, proteínas, fibra bruta e gordura bruta. A qual, para realização do teor de carboidratos foi estimada por diferença, considerando-se o total de 100%. Conforme normativas da AOAC (2025) com adaptações.

Para elaboração da embalagem rígida biodegradáveis foram realizadas manualmente, adaptando a metodologia proposta por Wolter, (2024), utilizando a proporção de (m/m) de amido de milho e farinha de semente de jaca. Inicialmente, foram pesadas em balança analítica (Modelo BL3200H, Marte/Shimadizu, Brasil) 80 g de farinha de semente de jaca, 80 g de amido de milho, 20 g de glicerol e 20 g de goma guar. A partir desta mistura, foram usados cerca de 280 mL de água destilada previamente aquecida em micro-ondas, em seguida adicionada aos poucos para que o material da mistura atingisse uma textura moldável.Após essa etapa de homogeneização, a mistura foi modelada de maneira manual, seguida de secagem em estufa com convecção forçada (modelo Luca-82/27, Lucadema, Brasil) a 65°C por 24 horas conforme e adaptado (Nascimento, 2024).

2.1 Caracterização das propriedades da embalagem rígida

2.1.1 Absorção de água

A absorção de água foi realizada a partir das metodologias descritas em Wolter, (2024) e Quispe-Sanchez et al., (2025). As amostras, previamente secas, foram inicialmente pesadas em balança analítica (Modelo BL3200H, Marte/Shimadzu, Brasil) para a obtenção da massa inicial (mo). Em seguida, as amostras foram individualmente imersas em recipiente plástico contendo 300 mL de água destilada,mantendo-se totalmente submersas em repouso. Cada tempo foi avaliado em triplicata (n=3), utilizando-se amostras independentes durante os intervalos de: 1, 5 e 10 minutos. Após cada período de tempo em imersão, o excesso de água foi retirado cuidadosamente através do uso das toalhas de papel, e a amostra foi devidamente pesada. O percentual de água absorvida foi calculado com base na diferença entre: massa inicial (mo) e massa final (mf), dividido pela massa inicial (mo), descrita pela equação 1, (adaptada de Wolter, 2024). Os resultados foram expressos como média ± desvio padrão.

Figura 1: Absorção de água (A%)

Em que:
mf= massa final da amostra após a absorção de água (g)
mo amosta= massa inicial da amostra (g)

2.1.2 Análise de dureza

Como ensaio mecânico foi realizado a análise de dureza, realizadas no Laboratório do Grupo de Estudos de Tribologia (LabGET), utilizando-se um durômetro Shore-A e Shore-D (Kori Durometer, modelo Shore A e Shore D, Kori Seiki, Japão). Os resultados foram obtidos a partir de uma média de 5 leituras aleatórias na superfície da amostra e para fins de comparação utilizou-se a bandeja de ovos como amostra controle. Os resultados foram expressos como média ± desvio padrão.

2.1.3 Análise de microscopía óptica.

Como adicional ao plano de trabalho, foi realizada a caracterização morfológica da superfície das amostras por microscopia óptica no Laboratório Institucional de Microscopia e Metrologia (LIME). As amostras da embalagem desenvolvida e da bandeja de ovo (controle) foram fixadas e analisadas em microscópio óptico (BX60M, Olympus, Japão) equipado com câmera digital acoplada, operando em modo de luz refletida. As imagens foram obtidas com ampliações de 60× e 100× para as amostras do compósito desenvolvido, e de 60×, 100× e 200× para a amostra controle (bandeja de ovos). A análise teve como objetivo avaliar qualitativamente a homogeneidade da superfície, a presença de poros, trincas e a dispersão das partículas da farinha de semente de jaca na matriz de amido de milho, buscando correlacionar a morfologia observada com os resultados de absorção de água e propriedades mecânicas.

Figura 2: a) Microscopia óptica da bandeja de ovo, b) Microscopia óptica da embalagem rígida desenvolvida.
Fonte: Autoria Própria

2.1.4 Análise de Biodegradabilidade

A biodegradabilidade em solo foi avaliada em triplicata segundo metodologia adaptada de Wolter (2024). Amostras da embalagem desenvolvida e da controle (bandeja de ovos comercial) foram padronizadas, pesadas em balança analítica (modelo AY220, Marte Científica) para obtenção da massa inicial (mo) e dispostas sobre telas de polietileno. As amostras foram enterradas a 4 cm de profundidade em recipientes de 2 L preenchidos com 8 cm de substrato orgânico (MaxAdubos), mantidos a 25 ± 2 °C e irrigados diariamente com 50 mL de água (umidade a ~70% da capacidade de campo). As amostras foram recuperadas aos 8, 16 e 24 dias, limpas, secas em estufa a 105 °C por 12 h e pesadas para a determinação da massa final (mf).

Figura 3: Taxa de biodegradabilidade

Em que:
mf biodegradabilidade= massa final após a biodegradabilidade (amostra + tela) (g)
mo amosta= massa inicial da amostra (g)

Resultados e Discussões

3.1 Composição centesimal da farinha de semente de jaca

Na tabela 1 apresenta-se o resultado da composição centesimal da farinha de semente de jaca expresso em percentual médio (%) e desvio padrão.

Tabela 1: Valores médios da composição centesimal da farinha de semente de jaca.

O teor de umidade da farinha da semente de jaca obteve valor de 5,9633%, valor este significativamente inferior em relação ao limite mínimo de 13% estabelecido para o desenvolvimento de atividade microbiana em farinhas (Armah et al., 2024). Este baixo percentual de umidade é essencial para retardar a degradação do material, inibindo a proliferação de fungos e bactérias e, resultando no favorecimento de um tempo de vida útil para a embalagem rígida (Armah et al., 2024). O conteúdo de cinzas apresentou um valor de 3,2480% 0,0200 superior ao da literatura proposta de Goswami e Chakrabarti (2016), onde as sementes da jaca apresentam o teor de cinzas entre 0,9% e 1,2%. Este alto percentual é proveniente da concentração de mineral elevada como cálcio, potássio e magnésio como presente nos estudos de Quispe-Sanchez et al., (2025).

Os menores teores foram obtidos para gordura 0,7949% 0,0232 e proteína 0,9998% 0,0794. O teor de gordura encontrado foi inferior ao reportado por Miguel (2023) para o amido da semente da jaca (2,60 %). Do ponto de vista estrutural, teores de proteínas e lipídios são desejáveis componentes essenciais para a estrutura da matriz polimérica durante o processo de gelificação (Quispe-Sanchez et al., 2025). O teor de fibras (4,5626% 0,4168) é um parâmetro relevante para as propriedades mecânicas do compósito. De acordo com Wolter (2024), a lignina e a hemicelulose são os polímeros responsáveis por conferir rigidez e resistência mecânica tanto às plantas quanto às embalagens às quais são adicionadas. O teor de fibra presente no material em estudo favorece a formação de uma rede densa através de ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila (-OH) das fibras e as moléculas de amido, resultando em um material menos quebradiço.

Por fim, o maior teor da análise centesimal decorre do elevado teor de carboidratos (84,4316 ± 0,1701%). Esse resultado confirma que a semente de jaca é rica em amido, polímero que constitui a matriz principal para o desenvolvimento de polímeros biodegradáveis (Miguel, 2023).

3.2 Elaboração da embalagem rígida

As embalagens rígidas foram obtidas por moldagem manual, adaptando-se à metodologia descrita por Nascimento (2024). A farinha de semente de jaca e o amido de milho foram misturados na proporção 1:1 (m/m) com adição de água destilada e glicerol (agente plastificante) sob agitação manual até a formação de uma massa homogênea. A massa foi então moldada manualmente em formas de vidro e submetida à secagem em estufa a 65 °C por 24 h. Durante a secagem, ocorre o fenômeno de retrogradação do amido, no qual as cadeias de amilose e amilopectina se reorganizam por meio de ligações de hidrogênio, conferindo rigidez à estrutura final (Miguel, 2023; Friedrichsen et al., 2022)

No entanto, embora a rigidez e dureza tenha sido alcançada, observou-se a integridade física da embalagem comprometida pela presença de rachaduras e fissuras após o processo de secagem em estufa. O que pode ter sido resultado de três fatores diversos como: Alta proporção das fibras em relação a presença de plastificante e o desafios da moldagem manual.

A alta proporção de fibras no processamento de desenvolvimento de embalagens, usando 50% de farinha de semente de jaca introduz uma carga elevada dos componentes lignocelulósicos. Observado por Wolter (2024), o excesso de fibra pode prejudicar a qualidade polimérica formado por amido resultando em superfícies mais irregulares e

rugosas devido a uma ligação de fibra deficiente. Consequentemente, embora o glicerol desempenha um papel fundamental como agente plastificante, usado para reduzir a natureza quebradiça do amido, a alta proporção de fibras necessitava de uma concentração maior de glicerol para manter a flexibilidade durante o processo de secagem. Nascimento (2024) detalha que recipientes produzidos com baixo teor de plastificante apresentaram defeitos de conformação mecânica e rachaduras em sua estrutura devido à rigidez excessiva na matriz.

Por fim, o desafio da moldagem manual. Diferentemente do método de termocompressão utilizado por Wolter (2024) através de uma prensa hidráulica a 210°C . A moldagem manual pode resultar uma distribuição heterogênea de componentes, observado por Nascimento (2024) que a mistura manual é de difícil espalhamento manual e que gera uma matriz com irregularidades e variações de homogeneidade.

Figura 4: Elaboração da embalagem rígida de farinha de semente de jaca e amido de milho

Fonte: Autoria Própria

3.3 Caracterização das propriedades da embalagem rígida

3.3.1 Absorção de água (A%)

Na tabela 2 apresentam-se os valores médios de absorção de água (A%) e desvios padrões da taxa de absorção referentes aos intervalos de tempo 1, 5 e 10 minutos para embalagem rígida de farinha da semente da jaca e amido milho.

Tabela 2:Valores médios da absorção de água (A%), nos intervalos de imersão em água de 1, 5 e 10 min para amostras da embalagem rígida de farinha da semente da jaca e amido milho.

Os resultados demonstram um aumento progressivo na capacidade de absorção de água ao longo do tempo de imersão. No primeiro minuto, a amostra apresentou absorção média de 6,217 ± 0,068%, valor que aumentou para 11,24 ± 0,222% aos 5 minutos e atingiu 16,00 ± 1,347% aos 10 minutos de imersão.

Este comportamento hidrofílico está correlacionado à propriedade do amido, incorporado na formulação da embalagem rígida. Conforme discutido por Jiang et al. (2020), as moléculas de amido possuem numerosos grupos hidroxila (-OH) em sua estrutura, o que confere elevada afinidade por água e, consequentemente, alta capacidade de absorção. Além da composição química, a granulometria da farinha de semente de jaca também contribui para esse fenômeno já que partículas menores aumentam a área de superfície de contato com o meio líquido, elevando a taxa de absorção de água (Wolter, 2024).

O aumento do desvio padrão observado no tempo de 10 minutos sugere que, com a imersão prolongada, a estrutura começa enfrentar empecilhos no processo de desorganização estrutural ou saturação, onde a variabilidade entre as triplicatas aumentam

devido ao início do enfraquecimento das ligações de hidrogênio internas, como observado por Miguel (2023).

3.3.2 Análise de dureza

A Tabela 3 apresenta os valores médios de dureza, expressos nas escalas Shore-A e Shore-D, acompanhados dos respectivos desvios padrão, para a embalagem rígida desenvolvida e para a bandeja de ovos comercial (controle).

Tabela 3: Médias e desvios padrão da dureza Shore-A e Shore-D da embalagem desenvolvida e do controle (bandeja de ovos).

Conforme apresentado na Tabela 3, os resultados obtidos nas escalas Shore-A e Shore-D revelaram que a embalagem rígida à base de farinha de semente de jaca e amido de milho apresentou dureza superior à do controle comercial (bandeja de ovos). Na escala Shore-A, que avalia materiais mais elásticos e macios, a embalagem desenvolvida apresentou valor médio de 82 ± 8,02, enquanto o controle registrou 66 ± 2,07. Já na escala Shore-D, utilizada para medir a resistência de plásticos mais rígidos, a embalagem experimental alcançou 43 ± 5,77, valor consideravelmente superior aos 25 ± 1,10 observados na bandeja de ovos comercial.

Esses resultados indicam que o compósito à base de semente de jaca e amido de milho apresenta baixa elasticidade e rigidez moderada, características atribuídas ao elevado teor de carboidratos (84,43%) e fibras (4,56%), que formam uma rede densa de ligações de hidrogênio na matriz polimérica (Miguel, 2023; Wolter, 2024).

A alta dureza observada pode estar associada à fragilidade do material, evidenciada pela presença de trincas e fissuras após a secagem. Conforme discutido por Nascimento (2024), materiais com elevada rigidez e baixa deformabilidade tendem a concentrar tensões internas durante a contração da matriz, resultando em defeitos estruturais. Trabalhos futuros devem avaliar a otimização da concentração de plastificante (glicerol) ou a adição de agentes de reforço que confiram tenacidade ao material sem comprometer sua rigidez.

3.3.3 Análise de biodegradabilidade

A análise de biodegradabilidade em solo foi conduzida com o objetivo de avaliar a capacidade de degradação da embalagem rígida desenvolvida a partir da farinha da semente de jaca e amido de milho em comparação com a bandeja de ovos convencional (controle), ao longo de 24 dias. Os resultados estão apresentados na Tabela 4, com suas respectivas médias e desvios padrão.

Tabela 4: Médias e desvios padrão da perda de massa (%) das amostras durante a biodegradação em solo ao longo de 24 dias.

Como apresentado na tabela 4, a embalagem rígida desenvolvida apresentou perda de massa progressiva ao longo dos 24 dias de ensaio, atingindo 88,08% no final do período, valor expressivamente superior ao observado para a bandeja de ovos comercial (47,58%). Esse resultado indica que o compósito à base de farinha de semente de jaca e amido de milho é altamente suscetível à biodegradação por microrganismos presentes no solo.

Devido ao fato da formulação da embalagem rígida ser composta majoritariamente por resíduo de alimento e amido de milho, a embalagem apresenta uma excelente fonte de carbono e biomassa, estimulando uma proliferação microbiana acelerada ao redor do material (Wolter, 2024; Nascimento, 2024). Esses microrganismos, que incluem agentes celulolíticos, hemicelulolíticas, amilolíticos e lignolíticos colonizando colonizam a superfície do material e secretam enzimas extracelulares na qual, ocorrem as quebras das cadeias macromoleculares de amido e celulose (Quispe-Sanchez et al., 2025). Como consequência, ocorrendo a fragmentação da matriz em pequenas partículas poliméricas que são posteriormente assimiladas e convertidas em gás carbônico, água e biomassa (Miguel, 2023; Nascimento, 2024; Quispe-Sanchez et al., 2025).

Conclusão

A partir dos resultados, conclui-se que a farinha da semente da jaca associada com o amido de milho apresenta viabilidade tecnológica promissora para o desenvolvimento de embalagens rígidas biodegradáveis. A caracterização centesimal confirmou que a farinha da semente da jaca possui uma composição rica em carboidratos 84,4316% 0,1701, com teores reduzidos em gordura 0,7949% 0,0232 e proteína 0,9998% 0,0794.

O processamento de secagem em estufa em 65°C por 24 h adaptado da literatura, possivelmente promoveu a retrogradação do amido e conferiu rigidez ao compósito. A integridade física da embalagem foi comprometida a partir da presença de trincas e rachaduras após a secagem, comportamento proporcionado pelo alto teor de fibras que enfraqueceu a matriz; ou pela insuficiência da concentração do agente plastificante, o glicerol e/ou proveniente da ineficiência na moldagem manual.

Por outro lado, a embalagem rígida apresentou um excelente desempenho de sustentabilidade, alcançando uma perda de massa de 88,08% ± 9,91% em apenas 24 dias de análise de biodegradabilidade em solo, superando expressivamente o controle comercial utilizado como a bandeja de ovos 47,58% ± 6,11%. A hidrofilia do amido e das fibras resultou na rápida degradação do material.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a otimização do teor do plastificante, o controle da granulometria na farinha e a migração para processos assistidos por pressão (termocompressão). Adicionalmente, é de interesse explorar a versatilidade da embalagem rígida para novas aplicações tecnológicas e agrícolas, como o desenvolvimento de cestos ou recipientes biodegradáveis. Devido à sua natureza hidrofílica e rápida taxa de degradação em solo, esses recipientes reduzem o uso de sacos

plásticos poluentes e podem ser plantados diretamente no solo junto com a muda. À medida que se decompõem pela microbiota local, os resíduos orgânicos são mineralizados de forma limpa, eliminando a necessidade de transplante manual e atuando como um adubo natural rico em carbono para favorecer o crescimento vegetal.

Por fim, agradeço pela colaboração de múltiplos setores para o desenvolvimento do estudo aos quais dedico, ao Complexo de laboratórios de Engenharia de Alimentos da UFRN, nas pessoas de Judson César Alves de Oliveira e Thaís Bezerra Veríssimo Miguel. Ao Laboratório Institucional de Microscopia e Metrologia (LIME), pelo auxílio técnico de Neyber Kildere do Nascimento Xavier na análises de caracterização e ao Laboratório do Grupo de Estudos de Tribologia (LabGET) pelo auxílio do técnico Daniel Ferreira França e pela disponibilidade da Profª Dra. Salete Martins Alves.

Referências

Armah, J. O., Appiah, V., Egblewogbe, M. N. Y. H., & Ocloo, F. C. K. (2024). Characterization of flour produced from gamma irradiated dried cassava (Manihot esculenta) chips. Radiation Physics and Chemistry, 218. https://doi.org/10.1016/j. radphyschem.2024.111651

AOAC. Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis of the association of chemists. 13.ª ed. Washington (DC). 2005.

FRIEDRICHSEN, J. S. A. et al. (2022) O uso de amido como proposta para embalagens biodegradáveis – Uma revisão. Research, Society and Development, v. 11, n. 14, e282111436449, 2022.

GOSWAMI, C.; CHACRABATI, R. Jackfruit (Artocarpus heterophyllus). In> PREEDY, V.R.;SIMMONDS, M.S.J. (Org.). Nutritional Composition of Fruit Cultivars, E.U.A.: Elsevier,Cap. 14, p.317- 335, 2016.

JIANG, Tang et al. Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, v. 3, n. 1, p. 8-18, 2020

MIGUEL, Thais Bezerra Verissimo. Desenvolvimento de filmes biodegradáveis a partir do amido da semente de jaca (Artocarpus heterophillus Lam.) com a incorporação de resíduo de acerola (Malphigia ermaginata). 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

NASCIMENTO, Jéssica Felipe do. Desenvolvimento de embalagens biodegradáveis a partir do processamento das vagens de algaroba (Prosopis juliflora). 2024. 95 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024.

NCUBE, L. K. et al. Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials. Materials, v. 13, n. 21, p. 1–24, 2020.

QUISPE-SANCHEZ, Luz et al. Biodegradable trays of cassava starch reinforced with Ceiba, coffee and cocoa fibers: a sustainable alternative to plastics. Applied Food Research, v. 5, Article 101277, 2025.

ROCHA, N. S. (2020) ROCHA, N. S. Desenvolvimento de massa alimentícia seca sem glúten à base de amido da semente de jaca (Artocarpus heterophyllus L.). 2020. 73 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição) – Centro de Ciências da Saúde, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020

RODRIGUES, Antonio Augusto Marques (2019) RODRIGUES, Antonio Augusto Marques. Revestimentos e filmes biodegradáveis de diferentes fontes amiláceas: caracterização e aplicação pós-colheita em manga. 2019. 131 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2019.

TURNER, A. Foamed Polystyrene in the Marine Environment: Sources, Additives, Transport, Behavior, and Impacts. Environmental Science and Technolog, v. 54, n. 17, p. 10411–10420, 2020. Available at:

WOLTER, Alessandra Teresinha. Desenvolvimento de embalagens rígidas biodegradáveis a partir de farelo de trigo e casca de pitaya. 2024. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024

Anexos



Figura 1: Absorção de água (A%)



Figura 2: a) Microscopia óptica da bandeja de ovo, b) Microscopia óptica da embalagem rígida desenvolvida.



Figura 3: Taxa de biodegradabilidade



Tabela 1: Valores médios da composição centesimal da farinha de semente de jaca.



Figura 4: Elaboração da embalagem rígida de farinha de semente de jaca e amido de milho



Tabela 2:Valores médios da absorção de água (A%), nos intervalos de imersão em água de 1, 5 e 10 min para amostras da embalagem rígida de farinha da semente da jaca e amido milho.



Tabela 3: Médias e desvios padrão da dureza Shore-A e Shore-D da embalagem desenvolvida e do controle (bandeja de ovos).



Tabela 4: Médias e desvios padrão da perda de massa (%) das amostras durante a biodegradação em solo ao longo de 24 dias.

CÓDIGO: ET0572

AUTOR: JOSE VALMIR GUERRA NETO

ORIENTADOR: OSVALDO CHIAVONE FILHO

TÍTULO: Regeneração de monoetilenoglicol em unidade de gás natural: comparação dos simuladores Aspen Plus e OLI Flowsheet: ESP

Resumo

O monoetilenoglicol (MEG) é amplamente empregado como inibidor termodinâmico de hidratos na produção de gás natural e, após o uso, precisa ser recuperado e regenerado para permitir seu reuso. Este trabalho avalia, no Aspen Plus, um trecho da unidade de regeneração de MEG do campo de Mexilhão, considerando uma corrente predominantemente constituída por água, MEG e NaCl. O caso desenvolvido anteriormente no OLI Flowsheet: ESP foi adotado como referência por apresentar boa representação do comportamento de fases, propriedades físico-químicas e solubilidade de sais. O modelo atual inicia-se na corrente IN-MAINF, na entrada do trocador HEATX1, e emprega o método ENRTL-RK. Foram avaliados três casos em base livre de sal, com w'MEG = 0,40, 0,50 e 0,60, mantendo-se NaCl em 1.454,20 kg/h. Como resultados, o Aspen Plus calculou, nos três casos, recuperação de MEG de 100% e pureza do lean-MEG de 97,7%, frente a 97,8% no OLI. A principal divergência ocorreu na demanda energética do evaporador flash, com valores 5,73%, 9,80% e 8,21% superiores aos da referência e diferença média de 7,91%. Essa divergência é relevante, pois maior demanda energética implica maior consumo de utilidades. O Aspen Plus reproduziu qualitativamente a tendência do sistema, porém superestimou quantitativamente a solubilidade do NaCl na mistura água + MEG em relação ao OLI, evidenciando uma limitação da parametrização disponível no simulador para esse sistema.

Palavras-chave: monoetilenoglicol; Aspen Plus; OLI Flowsheet; NaCl; regeneração

TITLE: Monoethylene Glycol Regeneration in a Natural Gas Unit: Comparison of Aspen Plus and OLI Flowsheet: ESP Simulators

Abstract

Monoethylene glycol (MEG) is widely used as a thermodynamic hydrate inhibitor in natural gas production and must be recovered and regenerated for reuse after operation. This work evaluates, in Aspen Plus, a section of the MEG regeneration unit of the Mexilhão field, considering a stream predominantly composed of water, MEG, and NaCl. A previously developed OLI Flowsheet: ESP case was adopted as reference because it provided a satisfactory representation of phase behavior, physicochemical properties, and salt solubility. The current model starts at stream IN-MAINF, at the inlet of heat exchanger HEATX1, and uses the ENRTL-RK method. Three salt-free MEG mass fractions were evaluated, with w'MEG = 0.40, 0.50, and 0.60, while the NaCl flow rate was kept at 1,454.20 kg/h. As results, Aspen Plus predicted, for all three cases, 100% MEG recovery and 97.7% lean-MEG purity, compared with 97.8% in OLI. The main divergence was observed in flash evaporator energy demand, with values 5.73%, 9.80%, and 8.21% higher than the reference and an average deviation of 7.91%. This difference is relevant because higher energy demand implies greater utility consumption. Aspen Plus reproduced the qualitative trend of the system but quantitatively overestimated NaCl solubility in the water + MEG mixture compared with OLI, indicating a limitation of the available simulator parametrization for this system.

Keywords: monoethylene glycol; Aspen Plus; OLI Flowsheet; NaCl; regeneration

Introdução

O monoetilenoglicol (MEG) é amplamente empregado como inibidor termodinâmico de hidratos em sistemas de produção de gás natural, especialmente em operações offshore submetidas a altas pressões e baixas temperaturas. A formação de hidratos pode reduzir a seção de escoamento ou bloquear linhas submarinas, de modo que a injeção de MEG constitui uma estratégia importante de garantia de escoamento. Após circular com os fluidos produzidos, o MEG retorna à plataforma diluído em água e contendo eletrólitos e outras espécies provenientes do fluido de formação. Para que possa ser reutilizado, torna-se necessário remover água e controlar as espécies salinas, recuperando uma corrente de lean-MEG adequada ao retorno ao processo.

No campo de Mexilhão, Moura-Neto et al. (2023) avaliaram diferentes configurações de recuperação e regeneração de MEG no OLI Flowsheet: ESP, incluindo os arranjos Full-Stream e Slip-Stream, com e sem coluna de destilação atmosférica. O modelo OLI foi confrontado com dados experimentais de propriedades físico-químicas, equilíbrio líquido-vapor e equilíbrio sólido-líquido e apresentou boa representação do sistema água + MEG + eletrólitos, o que justifica seu uso como referência neste trabalho (MOURA-NETO et al., 2023).

O presente estudo concentra-se no arranjo Full-Stream sem coluna de destilação atmosférica e considera, no trecho analisado, uma corrente predominantemente constituída por água, MEG e NaCl. O modelo atual não se inicia diretamente na corrente proveniente da produção de gás. O recorte começa na corrente IN-MAINF,

localizada na entrada do trocador de calor HEATX1. Essa escolha decorre do fato de que os parâmetros de interação íon-molécula necessários para representar com maior confiabilidade as etapas anteriores ainda não estão suficientemente definidos no modelo atual do Aspen Plus. Essa limitação compromete a representação da separação trifásica e, consequentemente, propagaria composições inadequadas para as correntes subsequentes. Por esse motivo, adotou-se como ponto de partida uma corrente posterior a essas etapas, preservando a consistência do trecho submetido à comparação.

A motivação central da pesquisa está na dificuldade de representar eletrólitos em solventes mistos. Moura-Neto et al. (2023) destacam que, em misturas de água com solventes orgânicos, a representação da solubilidade de sais torna-se mais complexa e depende fortemente do modelo de coeficientes de atividade. Para o sistema água + MEG + NaCl, dados experimentais mostram que a solubilidade do NaCl diminui com o aumento da fração de MEG (MONTEIRO et al., 2021). Esse comportamento pode ser observado na Figura 2. Uma descrição inadequada desse equilíbrio modifica a composição da fase líquida e os balanços de entalpia, repercutindo na carga térmica calculada para o evaporador flash.

Diante disso, o objetivo deste trabalho é reproduzir, no Aspen Plus, o trecho Full-Stream sem coluna de destilação atmosférica previamente avaliado no OLI Flowsheet: ESP e comparar os simuladores quanto à recuperação global de MEG, pureza do lean-MEG e demanda energética do evaporador flash, com atenção especial à influência da representação termodinâmica do sistema água + MEG + NaCl.

Metodologia

A simulação foi desenvolvida no Aspen Plus a partir da corrente IN-MAINF, localizada na entrada do trocador de calor HEATX1, correspondente ao mesmo ponto adotado para a comparação com o caso de referência no OLI Flowsheet: ESP. A corrente considerada é predominantemente constituída por água, MEG e NaCl e foi especificada a 25 °C e 130 kPa.

A vazão de NaCl foi mantida constante em 1.454,20 kg/h nos três casos estudados. As composições foram definidas em base livre de sal por meio de w'MEG, com valores nominais de 0,40, 0,50 e 0,60. No caso A, as vazões de água e MEG foram 10.425,25 e 7.039,97 kg/h, respectivamente. No caso B, foram utilizadas vazões de 8.665,40 kg/h de água e 8.799,95 kg/h de MEG. No caso C, as vazões correspondentes foram 6.905,61 e 10.559,90 kg/h.

Para a representação termodinâmica foi empregado o método ENRTL-RK, adequado ao tratamento de sistemas contendo eletrólitos e fase vapor. O equilíbrio sólido-líquido e a precipitação de NaCl foram habilitados no modelo.

O trecho de processo implementado inclui pré-aquecimento, evaporador flash, recuperação térmica, bombeamento e destilação a vácuo, conforme apresentado na Figura 1. A alimentação é inicialmente aquecida em HEATX1 por integração térmica

com a corrente quente proveniente da base da coluna de destilação. Em seguida, a corrente segue para o evaporador flash, especificado por temperatura e pressão. A pressão foi fixada em 15 kPa(abs), com temperatura de 140 °C para o caso A e 130 °C para os casos B e C. Nessas condições, a carga térmica é calculada pelo balanço de energia necessário para atingir o estado definido pelas especificações de temperatura e pressão.

Após o evaporador, a corrente segue para um segundo sistema de troca térmica. Nessa etapa, a corrente de topo da coluna de destilação, constituída majoritariamente por água, participa do resfriamento da corrente proveniente do evaporador. Uma corrente auxiliar de água do mar complementa a remoção de calor, promovendo a condensação necessária antes do bombeamento. Em seguida, a corrente condensada é pressurizada e encaminhada à coluna de destilação a vácuo.

A coluna foi representada a 30 kPa(abs), com 10 estágios, alimentação no estágio 5 e condição de operação de 135 °C. As pressões adotadas no evaporador flash e na coluna foram mantidas nas mesmas condições do caso de referência no OLI Flowsheet: ESP e encontram-se dentro das faixas típicas de regeneração sob vácuo reportadas na literatura. Moura-Neto et al. (2023), por exemplo, avaliaram o evaporador flash entre 15 e 35 kPa e a coluna de destilação a vácuo entre 30 e 50 kPa.

Os resultados do Aspen Plus foram comparados caso a caso com os valores obtidos no modelo de referência no OLI Flowsheet: ESP. Os principais indicadores analisados foram recuperação global de MEG, pureza do lean-MEG e demanda energética do evaporador flash. A análise termodinâmica considerou também a relação entre w'MEG e a solubilidade do NaCl. Os dados experimentais de Monteiro et al. (2021) mostram redução da solubilidade do sal à medida que a fração de MEG aumenta, comportamento utilizado como base para interpretar as diferenças energéticas observadas entre os simuladores.

Resultados e Discussões

Nos três casos avaliados, o Aspen Plus calculou recuperação global de MEG de 100%. A pureza do lean-MEG permaneceu em aproximadamente 97,7%, enquanto o caso de referência no OLI Flowsheet: ESP apresentou cerca de 97,8%. A diferença absoluta de aproximadamente 0,1 ponto percentual mostra que, para os indicadores globais de recuperação e pureza, os dois simuladores produziram resultados praticamente coincidentes.

A principal divergência foi observada na demanda energética do evaporador flash. Os valores obtidos para os três casos são apresentados na Tabela 1 e comparados graficamente na Figura 3. Para w'MEG = 0,40, correspondente ao caso A, o OLI apresentou 9,32 MW, enquanto o Aspen Plus calculou 9,85 MW, resultando em desvio relativo de 5,73%. No caso B, com w'MEG = 0,50, as cargas foram 8,30 MW no OLI e 9,12 MW no Aspen Plus, com desvio de 9,80%. Para w'MEG = 0,60, caso C, foram obtidos 7,83 MW no OLI e 8,48 MW no Aspen Plus, correspondendo a 8,21% de diferença. A média aritmética dos três desvios relativos foi 7,91%.

Apesar da diferença quantitativa, os dois simuladores reproduziram a mesma tendência global de redução da demanda energética com o aumento de w'MEG. Esse comportamento é coerente com o enriquecimento da alimentação em MEG e a correspondente redução relativa da fração de água no sistema. Moura-Neto et al. (2023) também observaram redução da demanda energética em condições de maior concentração de MEG na alimentação.

A concordância em recuperação e pureza, entretanto, não implica equivalência na previsão energética. A diferença sistemática observada está associada à forma como o sistema água + MEG + NaCl é representado termodinamicamente. O estudo de referência mostrou boa concordância do OLI com dados experimentais de equilíbrio sólido-líquido e de equilíbrio líquido-vapor para esse sistema (MOURA-NETO et al., 2023). Além disso, os dados experimentais de Monteiro et al. (2021), representados na Figura 2, demonstram que a solubilidade do NaCl diminui com o aumento da fração de MEG.

No Aspen Plus, a descrição do equilíbrio em solvente misto depende fortemente dos parâmetros empregados no modelo de coeficientes de atividade. Uma representação insuficiente das interações MEG-íon altera a solubilidade calculada do NaCl e, com isso, modifica a composição da fase líquida remanescente e os balanços de entalpia. Como o evaporador flash foi especificado por temperatura e pressão, essas diferenças termodinâmicas se refletem diretamente na carga térmica requerida para alcançar a condição operacional imposta.

Essa interpretação é compatível com o comportamento observado nas simulações: o Aspen Plus reproduziu a recuperação de MEG, a pureza do lean-MEG e a tendência de redução da demanda energética com o aumento de w'MEG, porém calculou cargas térmicas sistematicamente superiores às do OLI. Portanto, a principal diferença entre os modelos aparece na previsão energética, e não nos indicadores finais de separação.

Do ponto de vista de processo, essa diferença é relevante porque uma demanda energética maior implica maior consumo de utilidades e, consequentemente, maior custo associado à operação do evaporador. Para um equipamento em operação contínua, desvios entre 5,73% e 9,80% podem influenciar avaliações de desempenho e decisões de projeto ou otimização, mesmo quando recuperação e pureza permanecem praticamente coincidentes.

Os resultados indicam, portanto, a necessidade de aperfeiçoar a parametrização termodinâmica do Aspen Plus para o sistema água + MEG + NaCl. Já existem dados experimentais de solubilidade do NaCl e de equilíbrio líquido-vapor que podem ser empregados no ambiente de regressão do simulador. Os estudos de Moura-Neto et al. (2020) e Monteiro et al. (2021) fornecem dados experimentais diretamente aplicáveis ao sistema estudado.

Esses dados permitem ajustar GMENCC, GMENCD e GMENCE, associados aos parâmetros de interação do modelo eNRTL, além de GMENCN, relacionado ao parâmetro de não aleatoriedade, e a correlação K-SALT, empregada na representação do equilíbrio de dissolução e precipitação do sal. Esses parâmetros influenciam o cálculo da não idealidade e dos coeficientes de atividade e, consequentemente, a representação termodinâmica da fase líquida.

Após o refinamento da parametrização, a demanda energética do evaporador flash deverá ser novamente avaliada e comparada com o caso de referência. Em etapa posterior, com a representação termodinâmica mais bem estabelecida, o modelo poderá ser ampliado para incorporar as operações a montante que ficaram fora do recorte atual, incluindo separação trifásica, filtração com carbono e alimentação de bicarbonato de sódio.

Conclusão

O Aspen Plus reproduziu satisfatoriamente os principais indicadores de separação do caso de referência, com recuperação global de MEG de 100% e pureza do lean-MEG de aproximadamente 97,7%, frente a 97,8% no OLI Flowsheet: ESP. A principal divergência ocorreu na demanda energética do evaporador flash, para a qual o Aspen Plus apresentou valores superiores nos três casos avaliados, com desvios relativos de 5,73%, 9,80% e 8,21% e média de 7,91%.

Embora os valores absolutos de carga térmica tenham diferido, ambos os simuladores reproduziram a mesma tendência de redução da demanda energética com o aumento de w'MEG, indicando coerência qualitativa em relação ao efeito da composição da alimentação.

A diferença quantitativa está relacionada à representação termodinâmica da solubilidade do NaCl no solvente misto água + MEG. Uma descrição insuficiente das interações MEG-íon modifica a composição da fase líquida e os balanços de entalpia, refletindo-se na carga térmica calculada para a condição de temperatura e pressão especificada no flash.

Como continuidade, serão utilizados dados experimentais de solubilidade e equilíbrio líquido-vapor para regressão e validação de parâmetros do ENRTL-RK e da correlação K-SALT no Aspen Plus. Com o refinamento da parametrização, pretende-se aumentar a confiabilidade da previsão da demanda energética do evaporador flash. Posteriormente, o modelo poderá ser ampliado para incluir as operações a montante, como separação trifásica, filtração com carbono e alimentação de bicarbonato de sódio.

Os resultados obtidos até o momento mostram que o Aspen Plus apresenta boa capacidade de reprodução da recuperação e da pureza do MEG, mas ainda requer refinamento termodinâmico para representar com maior confiabilidade a demanda energética da unidade de regeneração.

Referências

MOURA-NETO, M. H.; MONTEIRO, M. F.; PEREIRA, L. S.; NASCIMENTO, J. F.; CHIAVONE-FILHO, O. Simulation and Analysis of MEG Reclamation and

Regeneration Unit in Offshore Natural Gas Plants. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 62, p. 15974-15985, 2023. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c01268.

MONTEIRO, M. F.; MOURA-NETO, M. H.; MOTA, A. L. N.; et al. Salt Solubility and Saturated Electrical Conductivity Data for Water + Monoethylene Glycol + NaCl in a Wide Temperature Range. Journal of Chemical & Engineering Data, v. 66, p. 1676-1683, 2021.

MOURA-NETO, M. H.; MONTEIRO, M. F.; MOTA, A. L. N.; SILVA, D. J.; NASCIMENTO, J. F.; PEREIRA, L. S.; CHIAVONE-FILHO, O. Isobaric Vapor-Liquid Equilibrium Measurements and Modeling of Water + Monoethylene Glycol + NaCl Mixtures. Journal of Chemical & Engineering Data, v. 65, p. 4827-4836, 2020. DOI: 10.1021/acs.jced.0c00351.

MONTEIRO, M. F.; MOURA-NETO, M. H.; MACEDO, G. M.; SILVA, G. V.; SILVA, D. J.; PEREIRA, L. S.; NASCIMENTO, J. F.; CHIAVONE-FILHO, O. Thermal Degradation of Monoethylene Glycol in Aqueous Saline Solution: Evaluation by Thermogravimetric and Physicochemical Analyses. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 58, p. 12159-12165, 2019.

Anexos



Figura 1. Fluxograma do trecho Full-Stream sem coluna de destilação atmosférica implementado no Aspen Plus. Fonte: autores.



Figura 2. Solubilidade do NaCl em misturas água + MEG em função de w'MEG e da temperatura. Fonte: adaptado de Moura-Neto et al. (2023).



Figura 3. Comparação da demanda energética do evaporador flash calculada pelo Aspen Plus e pelo OLI Flowsheet: ESP para os três casos avaliados. Fonte: dados das simulações.



Tabela 1. Composição da alimentação e comparação da demanda energética entre Aspen Plus e OLI Flowsheet: ESP. NaCl = 1.454,20 kg/h em todos os casos. Fonte: dados das simulações.

CÓDIGO: ET0578

AUTOR: FERNANDO HENRIQUE DO COUTO

ORIENTADOR: ANDRE LAURINDO MAITELLI

TÍTULO: Controle em Nuvem aplicado a Sistemas com Grande Atraso de Transporte

Resumo

Este relatório apresenta os resultados finais do projeto de pesquisa voltado ao estudo e desenvolvimento de estratégias de controle em nuvem aplicadas a sistemas com grande atraso de transporte. A pesquisa insere-se no contexto da Indústria 4.0, onde a execução remota de algoritmos de controle oferece escalabilidade, mas introduz desafios como latência de rede e perda de pacotes. Durante o projeto, realizou-se a modelagem matemática de sistemas com tempo morto e a implementação de controladores, como o Preditor de Smith e o Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC), utilizando o ambiente MATLAB/Simulink. Os resultados das simulações demonstraram que as estratégias adotadas foram capazes de compensar não apenas os atrasos inerentes ao processo físico, mas também as latências variáveis adicionadas pela comunicação em nuvem, garantindo estabilidade e robustez ao sistema global.

Palavras-chave: Controle em Nuvem, Atraso, Indústria 4.0, Preditor de Smith, MPC.

TITLE: Cloud-based Control Applied to Systems with Large Transport Delay

Abstract

This report presents the final results of the research project focused on the study and development of cloud control strategies applied to systems with large transport delays. The research falls within the context of Industry 4.0, where the remote execution of control algorithms offers scalability but introduces challenges such as network latency and packet loss. During the project, the mathematical modeling of systems with dead time and the implementation of controllers, such as the Smith Predictor and Model Predictive Control (MPC), were carried out using the MATLAB/Simulink environment. The simulation results demonstrated that the adopted strategies were able to compensate not only for the delays inherent in the physical process but also for the variable latencies added by cloud communication, ensuring stability and robustness to the overall system.

Keywords: Cloud Control, Transport Delay, Industry 4.0, Smith Predictor, MPC.

Introdução

Sistemas com grande atraso de transporte (time-delay systems) são frequentemente encontrados em aplicações industriais, redes de controle e telecomunicações. Esses atrasos, modelados como tempo morto, representam um desafio significativo na engenharia de controle, pois tendem a degradar o desempenho do sistema e comprometer a sua estabilidade. O estudo rigoroso desses sistemas é essencial para a síntese de controladores robustos que sejam capazes de lidar com incertezas e perturbações dinâmicas.

Paralelamente, o avanço da Indústria 4.0 consolidou o controle em nuvem (cloud control) como uma tendência na automação moderna. Esta arquitetura permite que os algoritmos de controle sejam executados em servidores remotos, descentralizando o processamento e facilitando a integração com recursos avançados. Contudo, essa abordagem introduz novas não-idealidades ao sistema, como latências de rede, atrasos variáveis (jitter) e a possibilidade de perda de pacotes de dados.

A convergência entre o controle em nuvem e os processos físicos que já possuem grandes atrasos de transporte constitui um cenário altamente desafiador. O presente projeto teve como objetivo geral investigar, desenvolver e validar estratégias de controle robusto capazes de operar de maneira estável neste cenário, avaliando o impacto combinado dos atrasos da planta e da rede de comunicação.

Metodologia

O desenvolvimento do projeto seguiu as diretrizes e o cronograma do plano de trabalho, iniciando-se com uma extensa revisão bibliográfica sobre metodologias de compensação de tempo morto e controle baseado em redes (Networked Control Systems).

Na segunda etapa, procedeu-se com a modelagem matemática de sistemas dinâmicos típicos com atraso de transporte utilizando equações diferenciais com atraso. Emulou-se o comportamento desses sistemas utilizando o software MATLAB e sua ferramenta Simulink. O ambiente de simulação foi essencial para representar não apenas a dinâmica física da planta, mas também para emular as restrições da arquitetura de nuvem, introduzindo artificialmente atrasos de comunicação variáveis.

Para o projeto dos controladores, foram implementadas e comparadas abordagens específicas. Inicialmente, o Preditor de Smith foi avaliado como método clássico de compensação de tempo morto. Em seguida, implementou-se o Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC), visando sua aplicação em arquiteturas distribuídas e sua capacidade de lidar de forma otimizada com previsões do modelo e atrasos de rede. As estratégias foram submetidas a análises de desempenho, avaliando critérios técnicos como tempo de estabilização, sobre-elevação (overshoot) e robustez a distúrbios e variações nos atrasos.

Resultados e Discussões

Os testes realizados no ambiente de simulação validaram a integração das estratégias de controle aplicadas a uma infraestrutura em nuvem simulada. A modelagem no MATLAB/Simulink permitiu separar e analisar individualmente o impacto do atraso de transporte inerente à planta e do atraso de comunicação imposto pela rede.

Nas simulações de base utilizando malhas de controle tradicionais, observou-se uma rápida degradação da estabilidade com a inserção das latências de comunicação. A introdução do Preditor de Smith permitiu que o sistema recuperasse a estabilidade para atrasos constantes e previsíveis. No entanto, a estratégia apresentou vulnerabilidades ao ser submetida às flutuações de latência características da rede em nuvem.

A implementação do MPC demonstrou os melhores resultados operacionais. Ao prever o comportamento futuro do sistema em um horizonte de tempo e incorporar o modelo dos atrasos na sua formulação matemática, o MPC apresentou elevada robustez mesmo em cenários com latência variável. Os ensaios de avaliação de desempenho confirmaram que a estratégia minimizou a sobre-elevação e otimizou o tempo de estabilização, comprovando a viabilidade de hospedar as leis de controle na nuvem sem comprometer os requisitos críticos de segurança e eficiência da operação.

Conclusão

O desenvolvimento do plano de trabalho permitiu investigar a fundo e validar estratégias de controle voltadas para sistemas complexos sujeitos a atrasos de transporte e rede. Ficou evidenciado que a transição do processamento local para uma arquitetura em nuvem demanda técnicas de controle além das clássicas convencionais. A aplicação do MPC mostrou-se uma solução estruturada e robusta para mitigar os impactos da latência variável e da comunicação remota.

Além dos resultados técnicos, a execução deste projeto proporcionou a aquisição de competências essenciais, desde a modelagem matemática aprofundada até a análise crítica de desempenho em ambientes de simulação avançados. Com isso, os objetivos estabelecidos foram alcançados, garantindo uma base sólida para a publicação de artigos científicos e para a continuidade dos estudos, seja por meio de ensaios com hardware in the loop ou na aplicação física das estratégias abordadas.

Referências

[1] CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. Model Predictive Control. [S. l.]: Springer, 2004.

[2] FENG, D.; QINGQUAN, Q. Networked Control Systems Based on Generalized Predictive Control and Modified Smith Predictor. In: WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION, 2008. Anais... [S. l.]: IEEE, 2008.

[3] FRIDMAN, E. Introduction to Time-Delay Systems. [S. l.]: Birkhäuser, 2014a. Disponível em: http://www.springer.com/series/4895.

[4] FRIDMAN, E. Tutorial on Lyapunov-based methods for time-delay systems. European Journal of Control, v. 20, n. 6, p. 271-283, nov. 2014b.

[5] GU, K.; KHARITONOV, V. L.; CHEN, J. Stability of Time-Delay Systems. [S. l.]: Birkhäuser, 2003.

[6] HESPANHA, J. P.; NAGHSHTABRIZI, P.; XU, Y. A survey of recent results in networked control systems. Proceedings of the IEEE, v. 95, n. 1, p. 138-172, jan. 2007.

[7] KHALIL, A. F.; WANG, J. Stability and time delay tolerance analysis approach for networked control systems. Mathematical Problems in Engineering, v. 2015. [S. l.]: Hindawi Publishing Corporation, 2015.

[8] NICULESCU, S.-I. Delay Effects on Stability - A Robust Control Approach. [S. l.]: Springer, 2001.

[9] ROSSITER, J. A. Model-Based Predictive Control: A Practical Approach. [S. l.]: CRC Press, 2003.

[10] VELAGIC, J. Design of Smith-like Predictive Controller with Communication Delay Adaptation. International Journal of Intelligent Systems and Technologies, [S. l.], 2008.

[11] ZHANG, W.; BRANICKY, M. S.; PHILLIPS, S. M. Stability of Networked Control Systems. IEEE Control Systems Magazine, [S. l.], 2001.

[12] ZHANG, X. M. et al. Networked control systems: A survey of trends and techniques. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, v. 7, n. 1, p. 1-17, jan. 2020.

CÓDIGO: ET0609

AUTOR: EKISUEL CARLOS FAGUNDES TEIXEIRA

ORIENTADOR: MEYSAM MASHHADIKARIMI

TÍTULO: COMPARAÇÃO DA SÍNTESE DE NIOBATO DE NÍQUEL ($NiNb_2O_6$) A PARTIR DO PRECURSOR COMERCIAL ATRAVÉS DA ROTA SOL GEL E ESTADO SÓLIDA

Resumo

Resumo

O Brasil possui uma das maiores reservas mundiais de nióbio, entretanto, aproximadamente metade de sua produção é destinada à exportação, o que evidencia a insuficiência de tecnologia nacional voltada ao beneficiamento e à agregação de valor a esse mineral. Nesse contexto, A busca cada vez mais crescente por dispositivos de armazenamento de energia eficientes e provenientes de fontes alternativas limpas tem levado ao surgimento de novos materiais que podem combinar elevadas propriedades elétricas e estabilidade eletroquímica diante desta necessidade pesquisas recentes têm se dedicado ao desenvolvimento de aplicações internas para o elemento, destacando-se os niobatos, cujas potenciais aplicações incluem baterias, fotodegradação de efluentes industriais, catálise em estado sólido e eletrólise da água voltada à produção de hidrogênio. O foco principal deste trabalho será na síntese e caracterização do niobato de níquel, comparando a síntese a partir do precursor oxalato de nióbio comercial. Serão empregadas duas rotas de síntese, como a reação por estado sólido e síntese sol-gel com o objetivo de otimizar os parâmetros de processamento para a obtenção de fases cristalinas puras do niobato de níquel. Os resultados esperados são a confirmação da obtenção do NiNb2O6 através dos difratogramas característicos do DRX (Difração de Raios X), bem como morfologia das partículas condizentes com a literatura, boa dispersão e pureza obtidos via MEV (Microscopia Eletrônica de Varredu

Palavras-chave: niobato de níquel; moagem de alta energia; sol-gel.

TITLE: COMPARISON OF THE SYNTHESIS OF NICKEL NIOBATE ($NiNb_2O_6$) FROM A COMMERCIAL PRECURSOR USING THE SOL-GEL AND SOLID-STATE METHODS

Abstract

Abstract

Brazil has one of the world's largest reserves of niobium; however, approximately half of its production is destined for export, which highlights the lack of domestic technology focused on processing this mineral and adding value to it. In this context, the ever-increasing demand for efficient energy storage devices powered by clean, alternative sources has led to the emergence of new materials that can combine high electrical properties with electrochemical stability. In response to this need, recent research has focused on developing domestic applications for the element, notably niobates, whose potential applications include batteries, photodegradation of industrial effluents, solid-state catalysis, and water electrolysis for hydrogen production. The main focus of this work will be on the synthesis and characterization of nickel niobate, comparing the synthesis using commercial niobium oxalate as a precursor. Two synthesis routes will be employed—solid-state reaction and sol-gel synthesis—with the aim of optimizing the processing parameters to obtain pure crystalline phases of nickel niobate. The expected results include confirmation of the synthesis of $NiNb_2O_6$ through characteristic XRD (X-ray diffraction) patterns, as well as particle morphology consistent with the literature, good dispersion, and high purity as observed via SEM (scanning electron microscopy).

Keywords: nickel niobate; high-energy milling; sol-gel.

Introdução

1 Introdução

O Brasil detém cerca de 98% das reservas mundiais de nióbio, mas exporta aproximadamente 89% de sua produção, evidenciando a falta de tecnologia nacional para agregar valor ao mineral [1]. Por isso, pesquisas recentes buscam desenvolver aplicações internas [2], destacando-se os niobatos em aplicações como usados em baterias [3], fotodegradação de efluentes industriais [4], catálise em estado sólido [5] e eletrólise da água para produção de hidrogênio [6].

Em comparação com outros óxidos de nióbio, os niobatos destacam-se por formarem a fase columbita (Pbcn), de estrutura ortorrômbica, que confere propriedades dielétricas, térmicas e químicas favoráveis, além de boa estabilidade mecânica, viabilizando diversas aplicações tecnológicas [7-9]. No caso do niobato de níquel ($NiNb_2O_6$) obtido por moagem de NiO e Nb_2O_5, contudo, formam-se fases indesejadas, como $Ni_4Nb_2O_9$, e resíduos dos precursores não reagidos, decorrentes da reação do niobato já formado com o Nb_2O_5 residual [10-13]. Esse problema pode ser reduzido por ajuste estequiométrico ou pelo uso de precursores mais reativos, como o oxalato de nióbio [14,15].

Dessa forma, métodos convencionais como moagem e reação em estado sólido não são eficazes para sintetizar $NiNb_2O_6$ puro em uma única etapa, resultando em resíduos de NiO e Nb_2O_5 não reagidos e na formação indesejada da fase coríndon $Ni_4Nb_2O_9$, cuja quantidade varia conforme as condições de calcinação [15, 16]. Além disso, como o $NiNb_2O_6$ só se forma em temperaturas relativamente elevadas, recomenda-se o uso de taxas de aquecimento elevadas para reduzir o tempo de difusão e minimizar instabilidades de fase [17].

Pesquisadores têm investigado rotas alternativas que oferecem alta pureza, homogeneidade, nanopós de alta atividade e menor temperatura de calcinação [18], como a combustão em solução, a coprecipitação e a síntese hidrotermal — métodos com complexidade e sensibilidade crescentes aos parâmetros de síntese. A combustão em solução é sensível à razão combustível/oxidante e à temperatura de ignição [19]; a coprecipitação depende principalmente do pH, da taxa de adição do precipitante e da temperatura [20]; e a síntese hidrotermal, a mais complexa e sensível, exige controle conjunto de pressão, temperatura, tempo e pH [21].

Dentre os métodos de síntese química, o sol-gel destaca-se por gerar partículas menores e mais uniformes, reduzir a temperatura de sinterização e evitar fases secundárias, com resultados já confirmados na síntese do niobato de níquel [22]. Em particular, o sol-gel protéico apresenta vantagens como baixa toxicidade, homogeneidade, controle estequiométrico e baixo custo [23], além de baixa contaminação e melhor cristalinidade em altas temperaturas [24]. Apesar de já aplicado na síntese de $CuNb_2O_6$ [25], ainda não há estudos que o utilizem na produção do niobato de níquel.

O oxalato de nióbio e amônio ($NH_4NbO(C_2O_4)\cdot H_2O$) é utilizado principalmente como precursor de nióbio estável e solúvel em processos de síntese, como o sol-gel [26], graças a propriedades como alta reatividade, estabilidade, baixo custo, boa solubilidade e baixa toxicidade [27], que viabilizam seu uso em rotas de síntese por via úmida com menor impacto ambiental e de segurança. Diversos estudos têm buscado otimizar sua síntese para ampliar suas propriedades e aplicações [28].

Até o momento, não há estudos que utilizem exclusivamente o oxalato de nióbio derivado do pentóxido de nióbio como precursor na síntese do $NiNb_2O_6$, avaliando sua influência sobre as condições de síntese e as características do material. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar a influência do uso do precursor comercial sobre a formação do niobato de níquel, em ambos os métodos de síntese sol-gel e reação por estado sólido, por meio da comparação da distribuição do tamanho de partículas e da dispersão do níquel.

Metodologia

2 Metodologia

2.1 Método

A metodologia consiste na produção e caracterização do niobato de níquel (NiNb2O6), com foco na comparação entre diferentes rotas de síntese química a partir dos precursores oxalato de nióbio ([NH4]3NbO[C2O4]3·H2O) e óxido de níquel (N2NiO6.6H2O). Os experimentos foram realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, mais especificamente nos Laboratórios de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais (LMCME) e no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais (LCEM), sendo o procedimento experimental completo ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da preparação

Fonte: autoria própria

2.2 Materiais Precursores

Os materiais precursores utilizados para a realização deste estudo foram os pós de Oxalato de Nióbio e Amônio fornecido polo CBMM, Nitrato de Níquel Hexahidratado, Trióxido de Diniquel com as seguintes porcentagens de pureza, repetitivamente. Oxalato de nióbio e amônio ((NH4)3NbO(C2O4)3·H2O, <99,99% de pureza), Nitrato de Níquel Hexahidratado (N2NiO6.6H2O, <97% teor de pureza mínima), Trióxido de Diniquel (Ni2O3, < 95% teor de pureza mínima).

2.2.1 Caracterização

Com a obtenção dos pós precursores, foi realizada a análise de Difração de raio X (DRX) que permitiram quantificar as fases formadas nas amostras. O difratômetro utilizado emprega radiação Cu-Kα (λ = 1,5406 Å), e os difratogramas foram analisados por meio do software X'Pert HighScore Plus 4.1, utilizado tanto para a análise qualitativa quanto quantitativa das amostras, possibilitando a medição e a identificação das fases e substâncias presentes no analito e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) referente ao percussor Oxalato de Nióbio e Amônio conforme a Figura 2.

Figura 2 – a) Difração de Raios X do precursor Oxalato de Nióbio e Amônio, b) Microscopia Eletrônica de Varredura do percussor Oxalato de Nióbio e Amônio.

Fonte: autoria própria

A Figura 2-a representa o gráfico referente aos picos do percussor Oxalato de Nióbio e Amônio que foi obtido pela técnica de Difração de Raios-X (DRX), na qual foi aplicada utilizando um difratômetro da marca Rigaku, modelo Miniflex II desktop x-ray diffractometer, disponibilizado pelo Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais do GNMS na UFRN. As análises foram conduzidas com os seguintes parâmetros: a faixa de varredura de 10 a 90° (2θ), com velocidade de 1°/min e passo de 0,02°. Posteriormente foi utilizado o software HighScore Plus versão 3.0 para a identificação das fases.

A Figura 2-b representa o resultado referente às características morfológicas do material que foram analisados utilizando um microscópio eletrônico de varredura da marca Carl Zeiss, modelo Auriga 40, disponibilizado pelo Laboratório de Caracterização Estrutural

dos Materiais (LCEM). A análise foi conduzida com os seguintes parâmetros: ampliação de 300 vezes, tensão de 5 KV e escala de análise variando de 20 µm.

2.3 Preparação do Niobato de Níquel por Síntese Sol – Gel

O pó de NiNb2O6 foi sintetizado pela rota sol-gel proteica, a partir de uma mistura estequiométrica e equimolar dos precursores de nióbio e níquel, pesados em balança analítica (SHIMADZU ATY 224R) na razão mássica 1:1 (Tabela 1). O precursor de nióbio, (NH4)3NbO(C2O4)3·H2O, foi dissolvido em solução aquosa a 60 °C por 15 minutos, seguido da adição do precursor de níquel, N2NiO6.6H2O, sob agitação na mesma temperatura por mais 15 minutos. Em seguida, adicionou-se gelatina sem sabor, atuando como agente quelante e polimerizante, o que promoveu aumento da viscosidade do sistema. A temperatura foi então elevada para 80 °C por mais 15 minutos, favorecendo a formação do gel, que foi finalmente pré-calcinado a 150 °C por 60 minutos, a uma taxa de 5 °C/min, para eliminação da água e dos compostos orgânicos voláteis.

Tabela 1- Massa dos pós precursores para Síntese Sol-Gel

Fonte: autoria própria

2.4 Preparação do Niobato de Níquel por Reação em Estado Sólido

Para a reação em estado sólido, foram utilizados o Trióxido de diniquel (Ni2O3) e o precursor oxálico. As pesagens dos pós foram realizadas em balança analítica (SHIMADZU ATY 224R), conforme a Tabela 2, e os materiais foram submetidos à moagem de alta energia em proporção estequiométrica, em meio líquido (álcool etílico), a 400 rpm por 10 horas, com razão massa bola:material de 1:10, utilizando-se um moinho planetário modelo Pulverisette 7. O processo foi realizado em cadinhos de metal duro de carbeto de tungstênio (93% WC + 6% Co), com densidade de 14,9 g/cm³, volume total de 45 mL e capacidade útil de 3 a 22 mL. As esferas, também de carbeto de tungstênio, apresentavam diâmetros de 10 mm e 15 mm, com massas individuais de 7,70 g e 25,98 g, respectivamente.

Tabela 2 - Massa dos pós precursores para Reação em Estado Sólido

Fonte: autoria própria

2.5 Tratamento térmico

Os pós resultantes de ambas as rotas de síntese foram macerados em um almofariz e, em seguida, pesados para a produção de uma pastilha de cada amostra com 0,4g. As pastilhas foram compactadas em uma prensa hidráulica uniaxial, sob pressão de 3000 Mpa, durante 1 minuto. Após a conformação, as pastilhas foram submetidas ao processo de calcinação em um forno tipo mufla de marca QUIMIS e modelo Q31821 opera em 220 V com potência de 1720 W, utilizando os seguintes parâmetros: temperatura de 1000 °C, por 180 min com taxas de 30 ºC/min. Concluída a calcinação, as amostras foram caracterizadas por Difração de Raios X (DRX), em um difratômetro Shimadzu, modelo XRD-7000, e por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em um microscópio Carl Zeiss, modelo Auriga 40. Ambas as análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais (LCEM).

Resultados e Discussões

3. Resultados e Discussão

3.1 Difração de Raios X

Os resultados obtidos foram consistentes com a formação dos picos característicos de $NiNb_2O_6$, evidenciando que a metodologia empregada que foi satisfatória para a obtenção das fases na condição de calcinação a 1000 °C, conforme pode ser observado na Figura 3. Nela, observa-se que a amostra apresenta os picos característicos da estrutura $NiNb_2O_6$ (carta padrão ICSD nº 015853) nas seguintes faixas de ângulo 2θ: 24,7°–35,7°; 36,6°–41,2°; 43,3°–53,5°; e 53,9°–68,6° [29]. Esses picos são bem definidos e de alta intensidade, indicando a formação de uma fase altamente cristalina de $NiNb_2O_6$, com o aumento da cristalinidade acompanhando o incremento da temperatura de calcinação. Além dos picos característicos do $NiNb_2O_6$, também foram identificados picos referentes ao NiO, provenientes da formação de fases secundárias em menor proporção [30; 31].

Figura 3 – Difração de Raios X do Niobato de Níquel por rota Sol-Gel e Difração de Raios X do Niobato de Níquel por Reação de Estado sólido.

Fonte: autoria própria

Além da análise de DRX, também foi realizada a verificação do tamanho do cristalito referente aos picos principais do $NiNb_2O_6$, utilizando-se a equação de Scherrer. Os resultados obtidos podem ser melhor visualizados na Tabela 3. De acordo com os dados adquiridos, a síntese via Sol-Gel apresentou um aumento significativo no tamanho do cristalito em comparação com o método de Estado Sólido [32]. Entretanto, observa-se que esse aumento não se mantém constante nas diferentes direções dos planos difratados

característicos do NiNb2O6, evidenciando um crescimento anisotrópico. Já no método de Estado Sólido, percebe-se um comportamento mais estável, com os valores se mantendo com maior consistência entre os picos analisados, isto se deve pelas condições de calcinação que têm um efeito bem significativo na formação de fases e no tamanho das partículas dos pós de NiNb2O6 calcinados [33]. Os pós de NiNb2O6 resultantes consistem em uma variedade de tamanhos de partículas aglomeradas, dependendo das condições de calcinação.

Tabela 3 – Tamanho do cristalito (Dscherrer) dos Picos principais do Difratograma

Fonte: autoria própria

3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permitiram avaliar aspectos morfológicos do niobato de níquel, como a morfologia e a distribuição do tamanho das partículas, conforme ilustrado na Figura 4. Observou-se uma diferença evidente na morfologia entre as amostras obtidas pelos diferentes métodos de síntese.

A amostra obtida por reação em estado sólido apresentou morfologia predominantemente alongada, característica da formação da fase do niobato de níquel. Também foram observadas regiões de morfologia irregular, destacadas por círculos na Figura 4; a etapa de moagem contribuiu tanto para a redução do tamanho das partículas quanto para o aumento da reatividade do sistema [34].Já a amostra sintetizada pelo método sol-gel também apresentou morfologia predominantemente alongada, porém com a presença de regiões de morfologia irregular (igualmente destacadas por círculos na Figura 4), associadas à formação de fases secundárias de óxido de níquel [35, 36].

Figura 4 – a-c) Microscopia Eletrônica de Varredura do Niobato por Reação de Estado sólido, d-g) Microscopia Eletrônica de Varredura do Niobato de Níquel por rota Sol-Gel.

Fonte: autoria própria

Também foram realizadas comparações entre a distribuição percentual dos elementos presentes no Niobato de Níquel obtido pelas duas rotas de síntese, conforme apresentado na Tabela 4. Os dados obtidos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) evidenciaram que a amostra sintetizada pelo método Sol-Gel apresentou maior

concentração de Nb e menores teores de Ni e O [37]. Já a amostra obtida por Reação em Estado Sólido apresentou comportamento inverso, com redução no teor de Nb e aumento nos teores de Ni e O [37; 38]. Essa diferença pode estar relacionada ao processo de moagem realizado na rota de estado sólido, que proporcionou um aumento na reatividade química do composto.

Tabela 4 – Distribuição dos elementos do Niobato de Níquel

Fonte: autoria própria

Além da distribuição percentual dos elementos presentes no Niobato de Níquel, também foi realizada a verificação do tamanho das partículas por meio do software ImageJ, cujos resultados são apresentados na Figura 5. De acordo com os valores obtidos, observa-se que a amostra sintetizada pela rota de Estado Sólido apresentou partículas de menor tamanho em comparação com a síntese por Sol-Gel, o que pode ser confirmado pelos valores de média, desvio padrão e os valores da distribuição normal desta forma apresentando uma homogeneidade maior para o gráfico referente à Reação de Estado sólidos [38, 39]. Essa diferença pode estar relacionada ao processo de moagem realizado na rota de estado sólido, que proporcionou uma redução no tamanho das partículas [40].

Figura 5 – a) Histograma por Reação de Estado Sólido, b) Histograma por Sol-Gel

Fonte: autoria própria

Conclusão

4. Conclusão

De modo geral, os resultados indicam que o precursor utilizado se mostrou eficaz para a produção do Niobato de níquel como também a escolha da rota de síntese que influencia diretamente as características cristalográficas e morfológicas do $NiNb_2O_6$, sendo a rota de Estado Sólido mais indicada quando se busca maior homogeneidade e menor tamanho de partícula, enquanto a rota Sol-Gel favorece a obtenção de cristalitos de maior tamanho médio, ainda que com menor uniformidade estrutural. Assim, a confirmação da formação dessa fase representa não apenas um avanço científico, mas também um passo estratégico

para a aplicação tecnológica do $NiNb_2O_6$, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 9, ao promover inovação e desenvolvimento de novos materiais avançados para a indústria, e o ODS 12, ao incentivar rotas de síntese mais eficientes e sustentáveis no uso de recursos.

Referências

Referências

[1] A. R. Alves and A. Dos Reis Coutinho, “The evolution of the niobium production in Brazil,” Materials Research, vol. 18, no. 1, pp. 106–112, Jan. 2015, doi: 10.1590/1516-1439.276414.

[2] DAPPER, Luiz H. et al. Ammonium niobium oxalate (ANO) as an efficient catalyst in the Paal–Knorr synthesis of N-substituted pyrroles. RSC Sustainability, v. 2, n. 2, p. 521-527, 2024.

[3] XIA, Rui et al. Nickel niobate anodes for high rate lithium-ion batteries. Advanced energy materials, v. 12, n. 1, p. 2102972, 2022.

[4] ARULPRAKASH, Guhananthan; VIJAYARAGHAVAN, R. Charge-separated 3D/2D layered heterojunction of NiNb2O6/E-gC3N4 as an efficient photocatalyst for photo-reduction of Cr6+ and photo-oxidation of dyes under visible and sunlight. Applied Surface Science, v. 684, p. 161938, 2025.

[5] NOWAK, Izabela; ZIOLEK, Maria. Niobium compounds: preparation, characterization, and application in heterogeneous catalysis. Chemical Reviews, v. 99, n. 12, p. 3603-3624, 1999.

[6] GUOCHANG, Li et al. Photoelectrochemical characterization of NiNb2O6. Solar energy materials, v. 21, n. 4, p. 335-346, 1991.

[7] C. de Brito Ferreira, L. Contri Campanelli, A. de Andrade Mendes Filho, G. Maria Leite Dalmonico, and D. Aparecida Pereira Reis, “The Influence of Niobium Addition on the Mechanical Properties and Microstructure of High-Strength Low-Alloy Steel Processed Through a Conventional Rolling Mill,” Materials Research, vol. 28, 2025, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2025-0447.

[8] S. Ramakrishna, A. Le Viet, M. V. Reddy, R. Jose, and B. V. R. Chowdari, “Nanostructured Nb2O5 polymorphs by electrospinning for rechargeable lithium batteries,” Journal of Physical Chemistry C, vol. 114, no. 1, pp. 664–671, Jan. 2010, doi: 10.1021/jp9088589.

[9] A. Pehlken and T. Zimmermann, “Material Life Cycles in Wind Energy Plants,” 2012.

[10] L. Bottura and A. Godeke, “Superconducting Materials and Conductors: Fabrication and Limiting Parameters,” Reviews of Accelerator Science and Technology, vol. 05, pp. 25–50, Jan. 2012, doi: 10.1142/s1793626812300022.

[11] T. Omar and M. M. Veiga, “Is niobium critical for Canada?,” Jun. 01, 2021, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.exis.2021.100898.

[12] KRISHNAMURTY, Kotra V.; HARRIS, Gordon M. The Chemistry of the Metal Oxalato Complexes. Chemical Reviews, v. 61, n. 3, p. 213-246, 1961.

[13] H. T. Kreissl et al., “Structural Studies of Bulk to Nanosize Niobium Oxides with Correlation to Their Acidity,” J. Am. Chem. Soc., vol. 139, no. 36, pp. 12670–12680, Sep. 2017, doi: 10.1021/jacs.7b06856.

[14] MATHERN, G.; WEISS, R.; ROHMER, R. The crystal structures of ammonium oxotrioxalatoniobate monohydrate and ammonium diperoxodioxalatoniobate monohydrate. Journal of the Chemical Society D: Chemical Communications, n. 2, p. 70-71, 1969.

[15] Q. Xue, D. Benson, M. A. Meyers, V. F. Nesterenko, and E. A. Olevsky, “Constitutive response of welded HSLA 100 steel,” Materials Science and Engineering: A, vol. 354, no. 1–2, pp. 166–179, Aug. 2003, doi: 10.1016/S0921-5093(03)00007-8.

[16] O. F. Lopes, V. R. De Mendonça, F. B. F. Silva, E. C. Paris, and C. Ribeiro, “Óxidos de nióbio: Uma visão sobre a síntese do Nb2O5e sua aplicação em fotocatálise heterogênea,” Jan. 01, 2015, Sociedade Brasileira de Quimica. doi: 10.5935/0100-4042.20140280.

[17] LEE, J.D., 1999. Química Inorgânica: não tão concisa. 5a ed. Ed. Blucher, São Paulo, Brasil, 544 p.

[18] SOUSA, R.M.F., FERNANDES, L.E. e GUERRA, W., 2013. “Nióbio”. Química Nova na Escola, Vol. 35, No. 1, pp. 68-69.

[19] CERNIAK, Samuel Nogueira. Estudo e desenvolvimento de um capacitor eletrolítico de nióbio. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

[20] STUART, H., Hulka, K., Bordignon, P., Tagusagawa, S.Y. e Carneiro, T., 1999. Usos e usuários finais de nióbio. CBMM, Araxá, Brasil, 60 p.

[21] CASTRO, Douclasse C. et al. Synthesis and characterization of mesoporous Nb2O5 and its application for photocatalytic degradation of the herbicide methylviologen. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 27, n. 2, p. 303-313, 2016.

[22] ALBUQUERQUE, S.L. e TORRESI, R.M., 1998. “Filmes de óxidos anódicos de nióbio: efeito eletrocrômico e cinética da reação de eletro-intercalação”. Química Nova. São Paulo, Brasil, Vol. 21, No. 3, pp. 284-288. doi:10.1590/S0100-40421998000300009.

[23] ZURER, P.S., 2003. “Niobium”. Chemical & Engineering News. ACS, Washington, D.C. USA, Vol. 81, No. 36, pp. 106-106.

[24] Y. Shan et al., “Niobium pentoxide: A promising surface-enhanced Raman scattering active semiconductor substrate,” NPJ Comput. Mater., vol. 3, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.1038/s41524-017-0008-0.

[25] I. Yaeger, A. H. Morrish, B. M. Wanklyn, Phys. Rev. B 1977,15, 1465.

[26] V. R. Wichman, H. Muller-Buschbaum, Z. Anorg. Allg. Chem. 1983,503, 101.

[27] O. Khamman, R. Yimnirun, and S. Ananta, “Phase and morphology evolution of corundum-type Ni4Nb2O9 powders synthesized by solid-state reaction,” Mater. Lett., vol. 61, no. 11–12, pp. 2565–2570, May 2007, doi: 10.1016/j.matlet.2006.09.056.

[28] H. Ehrenberg, G. Wltschek, H. Weitzel, F. Trouw, J.H. Buettner, T. Kroener, H. Fuess, Phys. Rev., B 52 (1995) 9595.

[29] C. Nico, T. Monteiro, and M. P. F. Graça, “Niobium oxides and niobates physical properties: Review and prospects,” Jul. 01, 2016, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.02.001.

[30] A. Farazin, S. Sahmani, M. Soleimani, A. Kolooshani, S. Saber-Samandari, and A. Khandan, “Effect of hexagonal structure nanoparticles on the morphological performance of the ceramic scaffold using analytical oscillation response,” Ceram. Int., vol. 47, no. 13, pp. 18339–18350, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.03.155.

[31] R. C. Pullar, “The synthesis, properties, and applications of columbite niobates (M 2+Nb2O6): A critical review,” Journal of the American Ceramic Society, vol. 92, no. 3, pp. 563–577, Mar. 2009, doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02919.x.

[32] A. L. Podkorytov, S. A. Shtin, A. L. Timofeev, and N. L. Yurovskaya, “Solid-state synthesis and properties of Ni4-xZrx/2Nb2O9,” Inorganic Materials, vol. 51, no. 8, pp. 816–819, Aug. 2015, doi: 10.1134/S0020168515080142.

[33] M. Wu, Y. Zhang, J. Chen, and M. Xiang, “Microwave dielectric properties of sol-gel derived NiZrNb2O8 ceramics,” J. Alloys Compd., vol. 747, pp. 394–400, May 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.02.300.

[34] YUANYUAN, Zhou et al. Photoluminescence of NiNb2O6 nanoparticles prepared by combustion method. 2007.

[35] SAMUEL, V. et al. A coprecipitation technique to prepare NiNb2O6. Materials Letters, v. 61, n. 11-12, p. 2354-2355, 2007.

[36] PANDIYAN, Rajaram; RAMESHKUMAR, Perumal; CHEN, Shen-Ming. Hydrothermal synthesis of pure phase doughnut-like NiNb2O6 nanostructures decorated reduced graphene oxide for sensitive electrochemical detection of azathioprine in water samples. Process Safety and Environmental Protection, p. 107446, 2025.

[37] YOU, Chao Yu; ZHANG, Ying Chun. Effects of CuO additives and sol–gel technique on NiNb2O6 dielectric ceramics for LTCC application. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, v. 27, n. 6, p. 6606-6613, 2016.

[38] LIU, Fangmeng et al. High performance mixed potential type acetone sensor based on stabilized zirconia and NiNb2O6 sensing electrode. Sensors and Actuators B: Chemical, v. 229, p. 200-208, 2016.

[39] LIU, Lingbo et al. Vacuum pyrolysis of ammonium paratungstate: Study on reaction mechanism and morphology changes of product. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 157, p. 105168, 2021. doi-org/10.1016/j.jaap.2021.1051

[40] W. Harris, “X-ray Diffraction Techniques for Soil Mineral Identifi cation,” 2008.

Anexos



Figura 1 – Fluxograma da preparação



Figura 2 – a) Difração de Raios X do precursor Oxalato de Nióbio e Amônio, b) Microscopia Eletrônica de Varredura



Figura 3 – Difração de Raios X do Niobato de Níquel por rota Sol-Gel e Difração de Raios X do Niobato de Níquel p



Figura 4 – a-c) Microscopia Eletrônica de Varredura do Niobato por Reação de Estado sólido, d-g) Microscopia Elet



Figura 5 – a) Histograma por Reação de Estado Sólido, b) Histograma por Sol-Gel



Tabela 1- Massa dos pós precursores para Síntese Sol-Gel



Tabela 2 - Massa dos pós precursores para Reação em Estado Sólido



Tabela 3 – Tamanho do cristalito (Dscherrer) dos Picos principais do Difratograma



Tabela 4 – Distribuição dos elementos do Niobato de Níquel

CÓDIGO: ET0624

AUTOR: AVYLLA ALOBENDNY BARRETO DE SOUZA

COAUTOR: JOYCE AZEVEDO BEZERRA DE SOUZA

ORIENTADOR: OSVALDO CHIAVONE FILHO

TÍTULO: POTENCIAL CATALÍTICO DA BIOTITA XISTO NA DEGRADAÇÃO DE FENOL EM MEIO AQUOSO

Resumo

A contaminação de recursos hídricos por compostos fenólicos é um problema ambiental relevante, sobretudo em efluentes da indústria do petróleo. O fenol é um contaminante prioritário devido à sua elevada toxicidade e persistência ambiental. Os Processos Oxidativos Avançados, especialmente a reação de Fenton heterogênea, surgem como alternativas eficientes ao empregar catalisadores sólidos alternativos, reduzindo custos e aproveitando materiais minerais residuais. Este trabalho avaliou o potencial catalítico da Biotita Xisto na degradação de fenol em meio aquoso via Fenton heterogêneo. Foram realizados dois planejamentos experimentais 2^2 com três pontos centrais, com volume reacional de 50 mL e concentração inicial de fenol de 30 mg/L, variando a concentração do catalisador (1,0-3,0 g/L e 1,5-3,5 g/L) e de peróxido de hidrogênio (5-9 mM e 9-15 mM), em pH 3,0 e 60 minutos de reação. A concentração de fenol foi determinada por HPLC. No planejamento mais brando, as degradações variaram entre 66% e 99%, com redução da eficiência ao aumentar o peróxido, atribuída ao sequestro de radicais hidroxila. No planejamento com concentrações mais elevadas, obtiveram-se degradações superiores a 98% nos ensaios com maior H2O2 e nos pontos centrais. Os ensaios controle confirmaram a necessidade da atuação conjunta entre catalisador e oxidante. Assim, a biotita xisto surge como alternativa promissora e sustentável para o tratamento de águas contaminadas com compostos fenólicos.

Palavras-chave: Fenton heterogêneo; biotita; fenol; degradação; oxidação química.

TITLE: CATALYTIC POTENTIAL OF BIOTITE SCHIST IN THE DEGRADATION OF PHENOL IN AQUEOUS MEDIUM

Abstract

Water contamination by phenolic compounds is a relevant environmental problem, especially in effluents from the petroleum industry. Phenol is a priority contaminant due

to its high toxicity and environmental persistence. Advanced Oxidation Processes, particularly the heterogeneous Fenton reaction, emerge as efficient alternatives by using alternative solid catalysts, reducing costs and enabling the use of residual mineral materials. This work evaluated the catalytic potential of Biotite Schist in phenol degradation in aqueous medium via heterogeneous Fenton process. Two 2^2 experimental designs with three central points were carried out, with a reaction volume of 50 mL and initial phenol concentration of 30 mg/L, varying catalyst concentration (1.0-3.0 g/L and 1.5-3.5 g/L) and hydrogen peroxide concentration (5-9 mM and 9-15 mM), at pH 3.0 for 60 minutes. Phenol concentration was determined by HPLC. In the milder design, degradations ranged from 66% to 99%, with reduced efficiency as peroxide increased, attributed to hydroxyl radical scavenging. In the design with higher concentrations, degradations above 98% were achieved at higher H2O2 and at central points. Control assays confirmed the need for joint action between catalyst and oxidant. Thus, biotite schist emerges as a promising and sustainable alternative for treating waters contaminated with phenolic compounds.

Keywords: Heterogeneous Fenton; Biotite; Phenol; Degradation; Chemical oxidation

Introdução

A contaminação de recursos hídricos por compostos fenólicos é um dos problemas ambientais mais recorrentes associados às atividades industriais, sobretudo àquelas ligadas à indústria do petróleo, à indústria petroquímica e à fabricação de resinas sintéticas. O fenol é um dos poluentes prioritários listados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), em razão de sua elevada toxicidade, baixa biodegradabilidade e persistência no ambiente aquático, podendo causar efeitos adversos à saúde humana e aos organismos aquáticos mesmo em baixas concentrações (Villegas et al., 2016).

Métodos convencionais de tratamento, como adsorção, extração e oxidação biológica, frequentemente apresentam limitações quando aplicados a efluentes com elevada carga de compostos recalcitrantes, sendo pouco eficientes para a remoção completa de fenóis (Villegas et al., 2016). Diante disso, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) surgem como alternativas promissoras, uma vez que se baseiam na geração in situ de radicais hidroxila (HO•), espécies altamente reativas e não seletivas, capazes de transformar compostos orgânicos complexos em subprodutos menos tóxicos ou mineralizá-los em dióxido de carbono e água.

Dentre os POAs, a reação de Fenton clássica (Fe2+/H2O2) é amplamente empregada devido à sua elevada eficiência, porém apresenta desvantagens operacionais associadas ao uso do ferro em fase homogênea, como a geração de lodo ferruginoso e a necessidade de faixas restritas de pH. A substituição do ferro solúvel por catalisadores sólidos, dando origem ao processo Fenton heterogêneo, contorna parte dessas limitações, possibilitando a reutilização do catalisador e reduzindo a geração de resíduos secundários (Garrido-Ramírez; Theng; Mora, 2010).

Minerais argilosos e filossilicatos ricos em ferro estrutural têm sido investigados como catalisadores heterogêneos alternativos para reações do tipo Fenton, uma vez que o ferro

presente na rede cristalina pode atuar como sítio ativo para a decomposição do H2O2 em radicais hidroxila. Estudos anteriores demonstraram que argilas naturais contendo ferro possuem eficácia na degradação de fenol e de corantes, alcançando remoções superiores a 90% sob condições reacionais brandas (Hassan; Hameed, 2011; Djeffal et al., 2014). A biotita, mica pertencente ao grupo dos filossilicatos, apresenta fórmula estrutural geral K(Mg,Fe2+)3(Al,Fe3+)Si3O10(OH,F)2, contendo ferro em suas formas divalente e trivalente na camada octaédrica, o que a torna um mineral potencialmente atrativo como fonte catalítica de baixo custo para processos Fenton heterogêneos (Deer; Howie; Zussman, 2013).

Apesar do potencial catalítico associado ao teor de ferro estrutural da biotita, sua aplicação específica como catalisador heterogêneo Fenton para a degradação de fenol permanece pouco explorada na literatura. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial catalítico da biotita xisto na degradação de fenol em meio aquoso por meio do processo Fenton heterogêneo, empregando um planejamento experimental fatorial para investigar a influência da concentração do catalisador e da concentração de peróxido de hidrogênio sobre a eficiência de degradação.

Metodologia

Para a realização dos ensaios experimentais, foi preparada uma solução aquosa sintética de fenol, com concentração inicial de aproximadamente 30 mg/L, armazenada em frasco âmbar para evitar sua fotodegradação até o momento do uso. A água destilada foi utilizada para a preparação de todas as soluções, e para a síntese da solução contaminada com fenol, utilizou-se uma solução (5%, Dinâmica).

Como catalisador heterogêneo, foi utilizada biotita xisto proveniente dos afloramentos geológicos da Província Pegmatítica da Borborema, especificamente na região do Seridó, no estado do Rio Grande do Norte, Brasil. A amostra foi obtida em estado bruto a partir de rejeitos de mineração local. Para o preparo do catalisador, blocos da rocha foram inicialmente fragmentados por quebra manual e, em seguida, macerados até a obtenção de um material particulado. O material macerado foi peneirado em malha de 150 mesh (abertura nominal de aproximadamente 105 μm), sendo utilizada a fração passante nessa malha como catalisador heterogêneo dos ensaios de degradação. O pH do meio reacional foi ajustado para 3,0, utilizando para o ajuste, quando necessário, ácido sulfúrico (H2SO4, 95%, Dinâmica) e hidróxido de sódio (NaOH, 98%).

Os ensaios de oxidação química foram realizados por meio de dois planejamentos experimentais fatoriais do tipo 2^2 acrescidos de três pontos centrais, sendo as variáveis de estudo de ambos a concentração do catalisador heterogêneo (biotita xisto) e a concentração do oxidante (peróxido de hidrogênio). Para o primeiro planejamento experimental, as condições analisadas foram 1,0-3,0 g/L de catalisador e 5-9 mM de H2O2 e, para o segundo planejamento experimental, houve um aumento dos níveis das concentrações estudadas, passando a ser 1,5-3,5 g/L de biotita e 9-15 mM do oxidante.

Para cada planejamento analisado, foram realizados dois ensaios controle, sendo um deles apenas fenol e catalisador (Fenol+BT), sem adição de H2O2, e outro contendo apenas

fenol e H2O2 (Fenol+H2O2), sem catalisador, a fim de avaliar isoladamente a contribuição de cada espécie na degradação do contaminante. Todos os ensaios reacionais foram conduzidos em volume total de 50 mL, sob agitação magnética constante, à temperatura ambiente, com pH mantido em 3,0 e tempo total de reação de 60 minutos.

Após o tempo reacional, alíquotas da amostra foram filtradas (PTFE Hidrofílico 0,46 µm, Nova Analítica) e armazenadas em vials contendo metanol como agente cessante da reação. A concentração residual de fenol foi determinada por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE, Prominence UFLCX-R, Shimadzu), a partir de curva de calibração previamente construída.

A eficiência do processo foi expressa em termos do percentual de degradação de fenol, calculado a partir da razão entre a concentração residual (C) e a concentração inicial (C0), determinadas em cada ensaio. Os dados experimentais foram tratados estatisticamente por meio do cálculo dos efeitos principais e de interação das variáveis estudadas, considerando a variabilidade experimental estimada a partir da repetição dos pontos centrais do planejamento, com aplicação de análise de variância (ANOVA) ao nível de confiança de 95%.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos para a degradação de fenol pelo sistema Fenton heterogêneo Biotita/H2O2, empregando concentrações de biotita xisto entre 1,0 e 3,0 g/L e de peróxido de hidrogênio entre 5 e 9 mM, após 60 minutos de reação, estão apresentados na Tabela 1.

Nesse sistema, observou-se elevada eficiência de degradação na maioria dos ensaios, com valores entre 66,41% e 99,13%. O maior percentual de degradação foi obtido no ensaio 2 (3,0 g/L de biotita e 5 mM de H2O2), enquanto o menor valor foi verificado no ensaio 3 (1,0 g/L de biotita e 9 mM de H2O2). Os pontos centrais (ensaios de 5 a 7) apresentaram boa repetibilidade, com degradação média de 94,21% e desvio-padrão de apenas 0,43, confirmando a reprodutibilidade do sistema reacional nas condições intermediárias. Adicionalmente, os ensaios controle desse sistema confirmaram a necessidade da atuação conjunta entre catalisador e oxidante: o ensaio Fenol+BT (2,0 g/L de biotita, sem H2O2) resultou em degradação praticamente nula, enquanto o ensaio Fenol+H2O2 (7 mM de peróxido, sem catalisador) apresentou remoção de apenas 3,80%.

Em seguida, avaliou-se o desempenho do sistema no planejamento conduzido com concentrações mais elevadas de catalisador, entre 1,5 e 3,5 g/L, e de peróxido de hidrogênio, entre 9 e 15 mM. Os resultados de degradação de fenol para esse sistema, obtidos após 60 minutos de reação, estão apresentados na Tabela 2.

Os resultados para o segundo planejamento realizado evidenciaram elevada eficiência do sistema Biotita/H2O2 na degradação do fenol, com valores próximos ou superiores a 100% em todos os ensaios conduzidos com a maior concentração de H2O2 (15 mM, ensaios 3 e 4) e nos pontos centrais do planejamento (ensaios 5 a 7, com 12 mM de H2O2).

Dos ensaios analisados, apenas os ensaios 1 e 2, conduzidos com a menor concentração de H2O2 (9 mM), apresentaram degradações significativamente inferiores, de 63,38% e 64,96%, respectivamente, independentemente da concentração de catalisador empregada (1,5 ou 3,5 g/L). Esse comportamento indica que, na faixa avaliada, a concentração de peróxido de hidrogênio foi o fator determinante para a eficiência do processo, uma vez que o H2O2 atuou como fonte primária de radicais hidroxila e sua baixa concentração, com seu posterior esgotamento no sistema, foi o fator limitante para geração de radicais, reduzindo a degradação do fenol.

Dos ensaios controle para esse sistema, verificou-se que, individualmente, nem o catalisador nem o oxidante seriam suficientes para degradar de forma eficiente o fenol: o ensaio contendo apenas o catalisador (Fenol+BT, 2,5 g/L de biotita e 0 mM de peróxido) resultou em degradação de apenas 2,83%, e o ensaio contendo apenas o agente oxidante (Fenol+H2O2, 12 mM de peróxido e 0 g/L de catalisador) apresentou remoção de 7,25%. Portanto, a elevada eficiência do sistema decorre da sinergia entre os reagentes, onde a biotita xisto atua efetivamente como catalisador na decomposição do H2O2 para a geração de radicais reativos, caracterizando o sucesso do processo Fenton heterogêneo.

Um comportamento interessante foi observado ao se comparar os dois planejamentos experimentais: enquanto no planejamento conduzido com concentrações mais elevadas de catalisador e de H2O2 (1,5-3,5 g/L e 9-15 mM) o aumento do peróxido de 9 para 15 mM elevou consistentemente a degradação de fenol, no primeiro planejamento, realizado com as condições mais brandas (1,0-3,0 g/L e 5-9 mM), o incremento da concentração de peróxido de hidrogênio de 5 para 9 mM resultou em uma redução da eficiência de degradação, tanto na menor quanto na maior concentração do catalisador (ensaio 1 para 3: de 89,97% para 66,41%; ensaio 2 para 4: de 99,13% para 93,47%). Esse comportamento é consistente com o efeito de sequestro de radicais hidroxila (radical scavenging), característico de sistemas Fenton quando o H2O2 está presente em excesso relativo à quantidade de sítios catalíticos ativos disponíveis: o peróxido em excesso reage com os próprios radicais HO• gerados, formando a espécie HO•2, de menor potencial oxidante, reduzindo a eficiência líquida do processo (Wang; Zhuan, 2020). Como as concentrações de catalisador empregadas neste planejamento (1,0 a 3,0 g/L) foram inferiores às do outro planejamento avaliado (1,5 a 3,5 g/L), a menor disponibilidade de sítios ativos de ferro estrutural pode ter favorecido esse efeito de autoconsumo do oxidante nas concentrações mais elevadas de H2O2 avaliadas.

Além da compreensão dos mecanismos existentes nos planejamentos experimentais, buscou-se realizar o estudo estatístico dos resultados obtidos. Para tanto, foi aplicada a análise de variância (ANOVA) aos dois planejamentos estudados. Os resultados indicaram que apenas o primeiro planejamento apresentou efeitos estatisticamente significativos. Dessa forma, a análise estatística foi aprofundada exclusivamente nesse planejamento, possibilitando uma avaliação mais detalhada das variáveis experimentais sobre as respostas analisadas. A ANOVA para o primeiro planejamento confirmou que as duas variáveis estudadas, concentração do catalisador ($p = 0,000556$) e concentração de peróxido de hidrogênio ($p = 0,000853$), bem como o termo de interação entre elas ($p = 0,002267$), foram estatisticamente significativas, considerando o nível de confiança de 95% sobre a degradação de fenol, como pode ser observado no gráfico de Pareto (Figura 1).

Por meio da ANOVA, ainda foi possível obter o gráfico de superfície de resposta tridimensional e o gráfico de contorno (Figura 2), que possibilitam uma análise estatística de forma visual sobre o efeito conjunto das variáveis concentração de BT e de H2O2 sobre a degradação do fenol.

A análise gráfica corrobora a discussão apresentada: no diagrama de Pareto, a concentração de catalisador (BT) mostrou o maior efeito padronizado sobre a degradação, seguida pela concentração de H2O2 e pelo termo de interação, ambos também significativos ao nível de 5% (p = 0,05). Nas superfícies de resposta, podem ser vistas as regiões que promovem uma maior degradação do fenol, regiões em vermelho mais escuro. Para tais condições, são necessárias maiores concentrações da biotita, enquanto o efeito da concentração do peróxido de hidrogênio é mais complexo, pois há condições boas desde concentrações mais baixas até mais altas. Assim, os diagramas ilustram graficamente a influência das variáveis sobre a degradação de fenol, complementando os resultados apresentados nas tabelas e permitindo que sejam tomadas decisões acerca de próximos passos de estudo em relação aos níveis das variáveis estudadas.

Conclusão

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a biotita xisto apresenta elevado potencial catalítico para a degradação de fenol em meio aquoso via processo Fenton heterogêneo, mostrando-se eficaz em duas faixas distintas de concentração de catalisador e de peróxido de hidrogênio. No planejamento conduzido com concentrações mais brandas (1,0-3,0 g/L de catalisador e 5-9 mM de H2O2), a maior degradação (99,13%) foi obtida com a maior concentração de catalisador combinada à menor concentração de peróxido, observando-se redução da eficiência à medida que o H2O2 aumentava, comportamento atribuído ao efeito de sequestro de radicais hidroxila em excesso de oxidante. Já no planejamento conduzido com concentrações mais elevadas (1,5-3,5 g/L de catalisador e 9-15 mM de H2O2), foram alcançadas degradações superiores a 98% nos ensaios com maior concentração de peróxido e nos pontos centrais (12 mM), evidenciando o desempenho eficiente do sistema catalítico nessas condições. A análise estatística confirmou que a concentração de catalisador, a concentração de peróxido de hidrogênio e o termo de interação entre essas variáveis exerceram efeito significativo sobre a degradação de fenol. Em conjunto, esses resultados evidenciam que o desempenho do sistema Fenton heterogêneo Biotita/H2O2 depende fortemente da razão entre catalisador e oxidante, e não apenas das concentrações absolutas de cada reagente, reforçando o potencial da biotita xisto como alternativa promissora, de baixo custo e sustentável para o tratamento de águas contaminadas com compostos fenólicos.

Referências

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 3. ed. Londres: Mineralogical Society, 2013.

DJEFFAL, L.; ABDERRAHMANE, S.; BENZINA, M.; FOURMENTIN, M.; SIFFERT, S.; FOURMENTIN, S. Efficient degradation of phenol using natural clay as heterogeneous Fenton-like catalyst. Environmental Science and Pollution Research, v. 21, p. 3331-3338, 2014. https://doi.org/10.1007/s11356-013-2278-5.

GARRIDO-RAMÍREZ, E.G.; THENG, B.K.G; MORA, M.L. Clays and oxide minerals as catalysts and nanocatalysts in Fenton-like reactions — A review. Applied Clay Science, v. 47, n. 3-4, p. 182-192, 2010. http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.044.

HASSAN, H.; HAMEED, B.H. Fe–clay as effective heterogeneous Fenton catalyst for the decolorization of Reactive Blue 4. Chemical Engineering Journal, v. 171, n. 3, p. 912-918, 2011. http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2011.04.040.

VILLEGAS, L. G. C.; MASHHADI, N.; CHEN, M.; MUKHERJEE, D.; TAYLOR, K. E.; BISWAS, N. A Short Review of Techniques for Phenol Removal from Wastewater. Current Pollution Reports, v. 2, n. 3, p. 157-167, 2016. http://dx.doi.org/10.1007/s40726-016-0035-3.

WANG, J.; ZHUAN, R. Degradation of antibiotics by advanced oxidation processes: an overview. Science of The Total Environment, v. 701, p. 135023, 2020. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135023.

Anexos



Tabela 1 – Degradação de fenol (%) para o sistema Fenton heterogêneo Biotita/H2O2 ([catalisador]: 1,0-3,0 g/L; [H2O2]: 5-9 mM), com 60 minutos de reação; [Fenol]0 = 30 mg/L e pH 3,0.



Tabela 2 – Degradação de fenol (%) para o sistema Fenton heterogêneo Biotita/H2O2 ([catalisador]: 1,5-3,5 g/L; [H2O2]: 9-15 mM), com 60 minutos de reação; [Fenol]0 = 30 mg/L e pH 3,0.



Figura 1 – Gráfico de Pareto para as variáveis analisadas no processo, indicando serem estatisticamente significativas.



Figura 2 – (a) Superfície de resposta tridimensional para o conjunto de dados do planejamento experimental mais brando e (b) gráfico de contorno para a variável resposta em função das concentrações de BT e H2O2 do mesmo planejamento.

CÓDIGO: ET0626

AUTOR: KAUA ADLER DA SILVA SOUZA

ORIENTADOR: MARIA CAROLINA BURGOS COSTA DO NASCIMENTO

TÍTULO: Obtenção de vitrímeros a partir da modificação de epóxi comercial

Resumo

O descarte de materiais termofixos ao final de sua vida útil constitui um desafio para a economia circular, uma vez que a reticulação covalente permanente dificulta processos convencionais de fusão, remoldagem e reciclagem. Neste contexto, as redes covalentes adaptáveis (CANs), particularmente os vitrímeros, surgem como uma alternativa capaz de combinar a estabilidade estrutural dos termofixos com a possibilidade de rearranjo topológico por meio de reações covalentes dinâmicas. Este trabalho teve como objetivo desenvolver redes vitriméricas a partir da modificação química de uma resina epóxi comercial com o agente de cura Pripol, investigando especificamente a influência do processamento sob vácuo sobre a estrutura química obtida. Foram comparadas amostras processadas sem vácuo e sob vácuo de 450 mmHg, com caracterização por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Os espectros apresentaram elevada concordância entre as condições de processamento, indicando que a aplicação de vácuo não comprometeu as principais funções químicas da rede. A presença de uma banda intensa em 1739 cm^{-1}, atribuída ao estiramento da carbonila de éster, juntamente com as absorções em 1243 e 1040 cm^{-1}, associadas a vibrações C–O–C/C–O, fornece evidências espectroscópicas compatíveis com a formação da rede epóxi-ácido. Paralelamente, a baixa intensidade da banda próxima a 915 cm^{-1} indica elevada conversão dos grupos oxirano, enquanto a permanência da banda O–H entre 3120 e

Palavras-chave: Vitrímeros; Resina epóxi; Redes covalentes adaptáveis; Transesterifica

TITLE: Obtaining vitrimers from the modification of commercial epoxy

Abstract

The disposal of thermoset materials at the end of their service life remains a challenge for circular economy strategies because permanent covalent crosslinking hinders conventional melting, remolding, and recycling processes. In this context, covalent adaptable networks (CANs), particularly vitrimers, have emerged as a promising class of materials capable of combining the structural stability of thermosets with topological rearrangement through dynamic covalent reactions. This study aimed to develop vitrimeric networks from the chemical modification of a commercial epoxy resin using

Pripol as the curing agent, with emphasis on the influence of vacuum processing on the resulting chemical structure. Samples processed without vacuum and under 450 mmHg vacuum were compared by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). The spectra exhibited a high degree of agreement between the processing conditions, indicating that vacuum application did not compromise the main chemical functionalities of the network. The intense band at 1739 cm^{-1}, assigned to ester carbonyl stretching, together with absorptions at 1243 and 1040 cm^{-1} associated with C–O–C/C–O vibrations, provides spectroscopic evidence consistent with the formation of the epoxy-acid network. The low intensity of the band near 915 cm^{-1} indicates high conversion of oxirane groups, while the persistence of the O–H band between 3120 and 3600 cm^{-1} demonstrates the presence of free hydroxyl groups, which are essential for dynami

Keywords: Vitrimers; Epoxy resin; Covalent adaptable networks; Transesterificati

Introdução

1. Introdução

Os polímeros termofixos ocupam posição estratégica em aplicações que demandam estabilidade dimensional, resistência química, estabilidade térmica e desempenho mecânico, propriedades decorrentes de uma rede molecular tridimensional reticulada por ligações covalentes. Entre esses materiais, as resinas epóxi destacam-se pela combinação de desempenho, facilidade de processamento e ampla aplicabilidade, sendo empregadas em revestimentos, adesivos, encapsulantes eletrônicos, isolantes e matrizes para compósitos destinados aos setores automotivo, aeroespacial, eletrônico, energético e da construção civil (VAN ZEE; NICOLAY, 2020; YANG; XU; JI; WEI, 2021; KUMAR; KRISHNAN; PRABAKARAN, 2024).

Apesar dessas vantagens, a mesma reticulação permanente responsável pelo elevado desempenho dos termofixos constitui uma limitação para sua circularidade. Após a cura, a rede não pode ser fundida de maneira convencional e apresenta baixa processabilidade por técnicas utilizadas para termoplásticos. Consequentemente, resíduos e componentes termofixos ao final da vida útil podem ser destinados a aterros ou a processos de recuperação energeticamente intensivos, levando à perda de material e de valor incorporado. A superação desse conflito entre desempenho e reprocessabilidade constitui, portanto, um problema relevante para o desenvolvimento de materiais poliméricos mais sustentáveis.

Uma estratégia para enfrentar essa limitação consiste nas Redes Covalentes Adaptáveis (Covalent Adaptable Networks – CANs), nas quais parte das ligações da rede apresenta caráter dinâmico. Dependendo do mecanismo de troca, as CANs podem ser classificadas como dissociativas ou associativas. Nas redes dissociativas, uma ligação é rompida antes que outra seja formada, o que pode provocar redução significativa da densidade de reticulação durante o rearranjo. Nas redes associativas, por outro lado, a formação da nova ligação ocorre concomitantemente à troca da ligação existente, mantendo aproximadamente constante a densidade de reticulação. Essa característica permite rearranjo topológico sem que o material perca necessariamente sua integridade estrutural (VAN ZEE; NICOLAY, 2020; ZHENG et al., 2021).

Os vitrímeros constituem uma classe de CANs associativas introduzida por Leibler e colaboradores. Seu comportamento combina uma rede covalente permanente com ligações capazes de sofrer reações de troca ativadas, tipicamente, por temperatura e catalisadores. Acima da temperatura característica de rearranjo topológico, a taxa dessas reações aumenta, permitindo relaxamento de tensões, remoldagem e reprocessamento. Diferentemente de um termoplástico convencional, entretanto, o material permanece reticulado durante o rearranjo, preservando a natureza de rede e, potencialmente, propriedades de estabilidade mecânica e dimensional (VAN ZEE; NICOLAY, 2020; YANG et al., 2021).

Entre os sistemas vitriméricos baseados em epóxi, as redes obtidas a partir da reação de grupos epóxi com ácidos policarboxílicos apresentam especial interesse devido à formação de ligações éster e de grupos hidroxila secundários. Durante a cura, a abertura do anel oxirano por grupos carboxílicos gera ligações éster e hidroxilas. Posteriormente, essas hidroxilas podem participar de reações de transesterificação, promovendo a troca associativa de ligações éster e permitindo o rearranjo da topologia da rede. Assim, a composição química da matriz não é apenas responsável pela cura, mas também determina a possibilidade de adaptação da rede em condições adequadas (CAPELOT et al., 2012; YANG et al., 2021).

Além da formulação química, as condições de processamento podem afetar a qualidade da matriz final. A presença de umidade, bolhas e espécies voláteis pode introduzir heterogeneidades e defeitos no material, dificultando a correlação entre estrutura química e desempenho. Nesse sentido, a aplicação de vácuo durante o preparo pode atuar como etapa de desgaseificação e remoção de voláteis, mas é necessário.

Metodologia

3. Metodologia

3.1. Formulação e processamento

Para a síntese dos sistemas vitriméricos, a resina epóxi comercial HEX 135 foi reacionada com o agente de cura Pripol (296 g/mol de ácido) e 5% molar de catalisador. Foram consideradas as condições de processamento registradas no estudo, incluindo EEW de 180 g/eq para a condição sem vácuo e 137 g/eq para a condição com aplicação de vácuo de 450 mmHg para desgaseificação. A comparação foi estabelecida para investigar o efeito do processamento sem atribuir ao vácuo alterações que não estejam sustentadas pela caracterização.

Inicialmente, o catalisador foi solubilizado no Pripol sob aquecimento a 120 °C por 1 h, etapa na qual foi observada a eliminação de bolhas. Em seguida, a resina epóxi previamente aquecida a 130 °C foi incorporada até completa homogeneização. As misturas foram então vertidas em moldes e submetidas às condições de cura definidas experimentalmente. O Teste 2 foi curado a 160 °C por 3 h, seguido de pós-cura a 180 °C por 2 h. Os Testes 3 e 4 foram curados a 130 °C por 6 h.

3.2. Caracterização por FTIR

As matrizes foram caracterizadas por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), em modo de absorbância. Os espectros das condições com e sem vácuo foram comparados quanto à posição e intensidade relativa das bandas características da rede epóxi-ácido. A interpretação concentrou-se nas regiões associadas às ligações O–H, C–H, C=O, C–O–C/C–O e ao anel oxirano.

Resultados e Discussões

4. Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta os espectros de FTIR das matrizes epoxídicas processadas nas condições sem vácuo e com aplicação de vácuo. Observa-se elevada concordância entre os perfis espectrais, indicando que o processamento sob vácuo não promoveu alterações substanciais na composição química das matrizes. As diferenças de intensidade observadas entre as amostras podem estar relacionadas principalmente à quantidade de espécies voláteis e à eficiência de sua remoção durante a etapa de desgaseificação.

Na região de 3120–3600 cm^{-1} observa-se uma banda larga associada principalmente ao estiramento O–H. Em sistemas epóxi-ácido, essa região pode apresentar contribuições de grupos hidroxila secundários formados durante a abertura dos anéis oxiranos, além de possíveis contribuições provenientes de ácido não reagido e umidade residual. A presença de grupos hidroxila é relevante para a arquitetura vitrimérica, uma vez que essas funções podem participar de reações de transesterificação sob condições adequadas. A menor intensidade relativa dessa banda na amostra submetida ao vácuo é compatível com uma menor quantidade de água e outras espécies voláteis residuais após o processamento.

As bandas observadas entre 2850 e 2960 cm^{-1} são atribuídas aos estiramentos simétrico e assimétrico das ligações C–H em carbonos sp^3, sendo características das estruturas alifáticas presentes na resina e no agente de cura. A manutenção desse conjunto de absorções em ambas as condições de processamento reforça a elevada similaridade química global das matrizes.

A banda intensa em 1739 cm^{-1} é atribuída ao estiramento da ligação C=O de grupos éster. Essa absorção é compatível com a formação de ligações éster decorrente da reação entre grupos epóxi e funções carboxílicas, acompanhada pela abertura do anel oxirano e formação de grupos β-hidroxiéster. A presença dessa banda tanto na amostra processada sem vácuo quanto naquela submetida ao vácuo indica que a etapa de desgaseificação não impediu a formação da estrutura química característica da rede epóxi-ácido.

Na região de 1243 cm^{-1}, a absorção pode ser associada a vibrações de estiramento C–O–C de grupos éster. A banda em aproximadamente 1040 cm^{-1} apresenta contribuição de vibrações C–O, relacionadas tanto a grupos éster quanto a grupos hidroxila formados durante a reação de cura. A ocorrência conjunta dessas absorções com a banda de carbonila em 1739 cm^{-1} fornece um conjunto coerente de evidências espectroscópicas da formação da rede epóxi-ácido.

Por sua vez, a região próxima a 915 cm^{-1} está associada às vibrações características do anel oxirano. A baixa intensidade dessa absorção indica elevado consumo dos grupos epóxi durante o processo de cura, sendo compatível com a ocorrência da reação de abertura do anel e consequente formação da rede reticulada. A semelhança entre as amostras processadas com e sem vácuo sugere que a aplicação de vácuo não alterou significativamente a conversão dos grupos epóxi.

Figura 2: Atribuição das principais bandas de FTIR.

A comparação entre os espectros evidencia que a principal diferença associada ao processamento sob vácuo está relacionada à intensidade de determinadas absorções, especialmente na região de O–H, enquanto as bandas características das funções éster permanecem presentes em ambas as condições. Esse comportamento é relevante porque permite distinguir alterações decorrentes das condições físicas de processamento de possíveis modificações na constituição química da matriz.

A redução da contribuição espectral na região de 3120–3600 cm^{-1} é compatível com a remoção de umidade e outras espécies voláteis durante a desgaseificação. Simultaneamente, a manutenção das absorções em 1739, 1243 e 1040 cm^{-1} indica a preservação das principais funções químicas associadas à rede de éster. Dessa forma, dentro dos limites da caracterização por FTIR, não foram observadas evidências de alterações significativas nas principais funções químicas formadas durante a cura em decorrência da aplicação de vácuo.

Os resultados sugerem, portanto, que o vácuo atua predominantemente como uma etapa de condicionamento físico da matriz, favorecendo a remoção de espécies voláteis sem modificar de forma expressiva sua identidade química. Esse efeito é particularmente relevante para o processamento de redes poliméricas, uma vez que a redução de umidade e de possíveis inclusões gasosas pode contribuir para uma matriz mais homogênea e, consequentemente, para uma avaliação mais consistente das propriedades mecânicas, térmicas e de reprocessamento.

A interpretação dos espectros também permite relacionar as características químicas observadas ao mecanismo de formação da rede. Inicialmente, grupos carboxílicos do agente de cura reagem com grupos epóxi da resina, promovendo a abertura do anel oxirano e a formação de grupos éster acompanhados pela geração de hidroxilas secundárias. A presença da banda de carbonila em 1739 cm^{-1}, das absorções associadas às ligações C–O–C/C–O em 1243 e 1040 cm^{-1} e a baixa intensidade da banda relacionada ao oxirano, em aproximadamente 915 cm^{-1}, são compatíveis com esse processo de cura.

Após a formação da rede, os grupos hidroxila permanecem incorporados à estrutura polimérica. Sob condições apropriadas de temperatura e na presença de catalisador, essas funções podem participar de reações de transesterificação, nas quais ocorre a troca de ligações éster sem a necessidade de ruptura global da rede covalente. Esse mecanismo pode proporcionar um rearranjo topológico associativo, permitindo alterações na conectividade local da rede sem necessariamente resultar em sua desreticulação.

É importante destacar, entretanto, que os resultados obtidos por FTIR fornecem principalmente evidências sobre a composição e as transformações químicas da matriz. A identificação de grupos funcionais compatíveis com uma rede epóxi-ácido e a presença de hidroxilas constituem condições favoráveis ao comportamento vitrimérico, mas não são, isoladamente, suficientes para confirmar sua reprocessabilidade macroscópica. A comprovação desse comportamento requer a combinação do FTIR com técnicas complementares, como relaxação de tensão, análise dinâmico-mecânica (DMA), calorimetria exploratória diferencial (DSC), análise termogravimétrica (TGA) e ensaios de reprocessamento. Esses resultados, em conjunto, permitem avaliar de forma quantitativa a dinâmica de rearranjo da rede, sua estabilidade térmica e a capacidade de manutenção das propriedades após sucessivos ciclos de processamento.

5. Principais achados

A análise por FTIR revelou um perfil químico altamente semelhante entre as matrizes processadas com e sem vácuo. A banda em 1739 cm^{-1}, associada ao estiramento da carbonila de grupos éster, fornece evidência compatível com a formação da estrutura epóxi-ácido, enquanto as absorções em 1243 e 1040 cm^{-1} corroboram a presença de funções C–O–C/C–O associadas a grupos éster e álcoois secundários. A baixa intensidade da banda próxima a 915 cm^{-1} é consistente com elevada conversão dos grupos oxirano durante o processo de cura. A presença da banda de O–H entre 3120 e 3600 cm^{-1} evidencia a manutenção de grupos hidroxila potencialmente relevantes para as reações de transesterificação dinâmica. Observou-se ainda uma redução da contribuição dessa região na matriz submetida ao vácuo, resultado compatível com a remoção de umidade e de outras espécies voláteis durante a desgaseificação. De modo geral, não foram observadas alterações espectrais que indiquem comprometimento das principais funções químicas da rede em decorrência da aplicação de vácuo. Esses resultados estabelecem uma base química consistente para a realização de investigações posteriores envolvendo o comportamento de reprocessamento e as propriedades termo-mecânicas das matrizes.

Conclusão

6. Conclusões

O presente estudo demonstrou a viabilidade de obtenção de redes poliméricas a partir da modificação química de uma resina epóxi comercial com o agente de cura Pripol, apresentando características espectroscópicas compatíveis com uma arquitetura epóxi-ácido de interesse para o desenvolvimento de materiais vitriméricos. A formação de grupos éster foi sustentada pela presença da banda de carbonila em 1739 cm^{-1} e pelas absorções em 1243 e 1040 cm^{-1}, enquanto a baixa intensidade do sinal próximo a 915 cm^{-1} foi consistente com o elevado consumo dos grupos oxirano durante o processo de cura. A presença de grupos hidroxila na região de 3120–3600 cm^{-1} constitui um resultado particularmente relevante, uma vez que essas funções podem participar de reações de transesterificação sob condições adequadas, mecanismo associado à capacidade de rearranjo das redes vitriméricas epóxi-ácido. Dessa forma, os resultados espectroscópicos estabelecem uma relação entre a estrutura química formada e o potencial de rearranjo topológico do material.

A comparação entre as condições de processamento demonstrou que a aplicação de

vácuo de 450 mmHg exerce efeito favorável principalmente sobre a desgaseificação da matriz, contribuindo para a redução de espécies voláteis e de umidade residual. A diminuição da intensidade relativa da região de O–H, acompanhada pela preservação das bandas características da estrutura éster, indica que o tratamento não comprometeu, dentro dos limites da caracterização por FTIR, as principais funcionalidades químicas da rede. Assim, os resultados obtidos respondem à questão proposta ao indicar que, nas condições avaliadas, o vácuo atua predominantemente como uma etapa de condicionamento físico do sistema, enquanto a arquitetura química associada à formação da rede é preservada. Entretanto, a confirmação do comportamento vitrimérico em escala macroscópica requer caracterizações complementares capazes de avaliar diretamente a mobilidade topológica, a relaxação de tensão, a estabilidade térmica, o desempenho mecânico e a capacidade de reprocessamento.
Como continuidade deste estudo, pretende-se realizar ensaios de reprocessamento em múltiplos ciclos, avaliando a integridade visual, dimensional e estrutural das amostras após cada etapa. Também serão investigados ensaios de relaxação de tensão em diferentes temperaturas, com o objetivo de quantificar a dinâmica de troca das ligações e determinar a influência da temperatura sobre o rearranjo da rede. A caracterização térmica por DSC e TGA permitirá avaliar transições térmicas, estabilidade e faixa de operação do material, enquanto a análise por DMA possibilitará correlacionar temperatura, módulo viscoelástico e mobilidade molecular da rede. Adicionalmente, será realizada uma comparação quantitativa da qualidade física das matrizes processadas com e sem vácuo, especialmente em relação à presença de bolhas, porosidades e outros defeitos de processamento.

Referências

7. Referências

CAPELOT, M.; MONTARNAL, D.; TOURNILHAC, F.; LEIBLER, L. Metal-Catalyzed Transesterification for Healing and Assembling of Thermosets. Journal of the American Chemical Society, v. 134, n. 18, p. 7664–7667, 2012.

DING, Z.; YUAN, L.; LIANG, G.; GU, A. Thermally resistant thermadapt shape memory crosslinked polymers based on silyl ether dynamic covalent linkages for self-folding and self-deployable smart 3D structures. Journal of Materials Chemistry A, v. 7, n. 16, p. 9736–9747, 2019.

HAO, C.; LIU, T.; ZHANG, S.; LIU, W. et al. Triethanolamine-Mediated Covalent Adaptable Epoxy Network: Excellent Mechanical Properties, Fast Repairing, and Easy Recycling. Macromolecules, v. 53, n. 8, p. 3110–3118, 2020.

KUMAR, S.; KRISHNAN, S.; PRABAKARAN, K. Renewable Resource-Based Epoxy Vitrimer Composites for Future Application: A Comprehensive Review. ACS Sustainable Resource Management, v. 1, n. 9, p. 2086–2107, 2024.

MAI, V.-D.; SHIN, S.-R.; LEE, D.-S.; KANG, I. Thermal Healing, Reshaping and Ecofriendly Recycling of Epoxy Resin Crosslinked with Schiff Base of Vanillin and Hexane-1,6-Diamine. Polymers, v. 11, n. 2, p. 293, 2019.

MENG, F.; SAED, M. O.; TERENTJEV, E. M. Elasticity and Relaxation in Full and Partial Vitrimer Networks. Macromolecules, v. 52, n. 19, p. 7423–7429, 2019.

RÖTTGER, M.; DOMENECH, T.; VAN DER WEEGEN, R.; BREUILLAC, A. et al. High-performance vitrimers from commodity thermoplastics through dioxaborolane metathesis. Science, v. 356, n. 6333, p. 62–65, 2017.

SHI, Q.; YU, K.; KUANG, X.; MU, X. et al. Recyclable 3D printing of vitrimer epoxy. Materials Horizons, v. 4, n. 4, p. 598–607, 2017.

VAN ZEE, N. J.; NICOLAY, R. Vitrimers: Permanently crosslinked polymers with dynamic network topology. Progress in Polymer Science, v. 104, p. 101233, 2020.

WU, Y.; WEI, Y.; JI, Y. Polymer actuators based on covalent adaptable networks. Polymer Chemistry, v. 11, n. 33, p. 5297–5320, 2020.

WU, Y.; WEI, Y.; JI, Y. Carbon material/vitrimer composites: Towards sustainable, functional, and high-performance crosslinked polymeric materials. Giant, v. 13, p. 100136, 2023.

YANG, Y.; TERENTJEV, E. M.; WEI, Y.; JI, Y. Solvent-assisted programming of flat polymer sheets into reconfigurable and self-healing 3D structures. Nature Communications, v. 9, n. 1, p. 1906, 2018.

YANG, Y.; XU, Y.; JI, Y.; WEI, Y. Functional epoxy vitrimers and composites. Progress in Materials Science, v. 120, p. 100710, 2021.

ZHENG, J.; PNG, Z. M.; NG, S. H.; THAM, G. X. et al. Vitrimers: Current research trends and their emerging applications. Materials Today, v. 51, p. 586–625, 2021.

Anexos



Fig. 1



Fig. 2

CÓDIGO: ET0727

AUTOR: RODRIGO SOUZA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: NATHALIA SARAIVA RIOS

TÍTULO: Desenvolvimento de Biocatalisadores à Base de Fibra de Coco Verde para a Síntese de Butirato de Etila

Resumo

A imobilização de lipase em suportes lignocelulósicos é uma estratégia promissora para biocatalisadores estáveis, de baixo custo e reutilizáveis. A fibra de coco verde (GCF) in natura (GCF-IN) ou pré-tratada (ácida, GCF-H+; hidrotérmica, GCF-HY; explosão a vapor, GCF-EX) foi avaliada como suporte para imobilização por adsorção física da lipase B de Candida antarctica (CalB) em pH 5,0, 7,0 e 9,0, gerando doze biocatalisadores. Além do rendimento de imobilização e recuperação de atividade, avaliaram-se o ponto de carga zero (PZC) da fibra, a resistência à dessorção frente a Triton X-100 e NaCl, e a inativação térmica a 70 °C. Nove dos doze suportes alcançaram rendimentos superiores a 80%, com GCF-EX-CalB (pH 5,0) e GCF-H+-CalB (pH 7,0) recuperando cerca de 42% da atividade teórica. O PZC (6,7–7,4) explicou as tendências dependentes do pH, evidenciando contribuição eletrostática além de interações hidrofóbicas; o NaCl reduziu mais a atividade que o Triton X-100, confirmando predomínio eletrostático na ancoragem. A estabilidade térmica variou com o pré-tratamento: a GCF-H+-CalB apresentou a maior meia-vida (5,99 min), levemente superior à da enzima solúvel. Na síntese de butirato de etila, os biocatalisadores igualaram ou superaram a enzima solúvel após 48 h (conversão de 79–86%) e mantiveram mais de 80% de conversão após cinco ciclos. Esses resultados confirmam a GCF como suporte viável, no qual o pH de imobilização exerce maior influência que o pré-tratamento.

Palavras-chave: Coco Verde; CalB; Imobilização; Esterificação; PZC; Dessorção.

TITLE: Development of Coconut Fiber-Based Biocatalysts Green for the Synthesis of Ethyl Butyrate

Abstract

Lipase immobilization on lignocellulosic supports is a promising strategy for stable, low-cost, reusable biocatalysts. Green coconut fiber (GCF) was evaluated as a support for immobilizing Candida antarctica lipase B (CalB) by physical adsorption. Raw fiber (GCF-IN) and fiber pretreated by acid (GCF-H+), hydrothermal (GCF-HY), or steam

explosion (GCF-EX) were combined with three immobilization pH values (5.0, 7.0, 9.0), yielding twelve biocatalysts. Beyond immobilization yield and activity recovery, this report adds fiber point of zero charge (PZC), desorption resistance to Triton X-100 and NaCl, and thermal inactivation at 70 °C. Nine of twelve supports reached yields above 80%, and GCF-EX-CalB and GCF-H+-CalB recovered close to 42% of theoretical activity at their optimum pH. Fiber PZC (6.7–7.4) tracked the pH-dependent immobilization trends, supporting an electrostatic contribution alongside hydrophobic interactions. NaCl removed more activity than Triton X-100, indicating electrostatic interactions dominate anchoring. Thermal stability varied with pretreatment; GCF-H+-CalB showed the longest half-life (5.99 min), slightly above the soluble enzyme. In ethyl butyrate synthesis, immobilized biocatalysts matched or exceeded the soluble enzyme after 48 h (79–86% conversion) and retained over 80% of conversion after five cycles. These results confirm GCF as a viable support for lipase immobilization, with immobilization pH exerting a stronger influence than pretreatment.

Keywords: Coconut Fiber; CalB; Immobilization; Esterification; PZC; Desorption.

Introdução

As taxas de muitas reações relevantesindustrialmente, como hidrólise, esterificação e transesterificação, foram substancialmente melhoradas pelo uso de lipases. Essas enzimas apresentam ampla especificidade de substrato e alta seletividade, o que as torna catalisadores atrativos para as indústrias de detergentes, farmacêutica e de biocombustíveis. Uma limitação importante do uso de lipases em sua forma livre (solúvel), no entanto, é sua baixa estabilidade operacional e a impossibilidade de recuperar e reutilizar o biocatalisador ao longo de múltiplos ciclos de reação.

A imobilização por adsorção física em um suporte sólido resolve essa limitação de forma simples, com custo baixo e escalável. A enzima é retida na superfície do suporte por meio de uma combinação de forças de Van der Waals, interações hidrofóbicas e atração eletrostática, sem exigir química covalente ou agentes ativadores caros. O desempenho de um biocatalisador baseado em adsorção, no entanto, depende fortemente da natureza físico-química do suporte: sua carga superficial, porosidade, área superficial e hidrofobicidade influenciam quanto de enzima pode ser ancorado e quanto de sua atividade catalítica é retida após a imobilização.

A fibra de coco verde já demonstrou ser um suporte de adsorção eficaz para a CalB, melhorando a estabilidade térmica em relação à enzima solúvel em trabalhos anteriores de outros grupos [11]. A fibra de coco verde (GCF) é um resíduo lignocelulósico abundante e de baixo valor, gerado em grandes volumes pela indústria de água de coco. Submeter essa biomassa a diferentes pré-tratamentos (hidrólise ácida, tratamento hidrotérmico ou explosão a vapor) modifica sua porosidade, química superficial e carga superficial, o que, por sua vez, deve influenciar seu desempenho como suporte de imobilização. Este estudo caracteriza a imobilização da CalB na GCF sob diversas dimensões complementares: (i) o ponto de carga zero (PZC) de cada fibra pré-tratada, usado para racionalizar a dependência do pH nos rendimentos de imobilização; (ii) a resistência à dessorção da enzima frente a um surfactante não iônico e a um desafio de alta força iônica, usada para investigar a natureza da interação enzima-suporte; e (iii) a cinética de inativação térmica da enzima solúvel e imobilizada a 70 °C, usada para

quantificar o efeito estabilizante da imobilização. Em conjunto com os dados de imobilização, esterificação e estabilidade operacional, este conjunto de dados fornece um panorama abrangente de como o pré-tratamento e o pH de imobilização governam o desempenho da GCF como suporte de lipase para a síntese de butirato de etila, um éster de aroma de interesse industrial.

Metodologia

Moagem e peneiramento

A fibra de coco verde (GCF) foi seca a 60 °C por 72 h, moída em moinho de facas e peneirada em peneiras de 20 e 48 mesh; a fração retida entre as duas peneiras (GCF-IN, fibra in natura) foi o suporte de referência para todos os pré-tratamentos e ensaios de imobilização.

Pré-tratamentos e lavagem da fibra

Três pré-tratamentos foram aplicados a lotes separados de GCF-IN para modificar sua química superficial e porosidade:

- Explosão a vapor (GCF-EX): 100 g de biomassa, 10 min a 210 °C e 20 bar em um reator de 100 L, seguido de lavagem e secagem a 60 °C por 24 h.

- Pré-tratamento ácido (GCF-H+): GCF a 10% (m/v) em ácido sulfúrico 1% (v/v), autoclavada a 121 °C por 60 min e em seguida secada a 60 °C por 24 h.

- Pré-tratamento hidrotérmico (GCF-HY): GCF a 10% (m/v) em água destilada, aquecida a 80 °C por 120 min, seguida de lavagem, filtração e secagem a vácuo.

Todos os suportes foram então lavados com água destilada em pH 5,5 (1:20, m/v): cinco ciclos de 1 h para as fibras pré-tratadas e dez ciclos para a fibra bruta, a fim de remover extrativos solúveis. Antes da imobilização, os suportes foram incubados por 24 h sob agitação suave em pH 5,0, 7,0 ou 9,0 (tampão de acetato de sódio, fosfato de sódio ou carbonato de sódio 5 mM, respectivamente) para que a superfície da fibra se equilibrasse com o tampão de imobilização.

Determinação do ponto de carga zero (PZC)

O PZC foi determinado pelo método de adição de sólido (deriva de pH), abordagem amplamente utilizada para caracterizar a carga superficial de adsorventes [12]. Para cada pré-tratamento, 0,1 g de fibra seca foi adicionado a 20 mL de água deionizada previamente ajustada a doze valores de pH inicial (pH0 = 1–12) com HCl ou NaOH. As suspensões foram agitadas por 24 h a 120 rpm, 23 °C, e o pH final (pHf) foi medido em duplicata. O PZC foi tomado como o pH0 no qual ΔpH (= pHf − pH0) cruza zero, ponto de carga superficial líquida neutra. Como teste adicional, a fibra bruta (GCF-IN) foi pré-

incubada nos três tampões de imobilização antes do ensaio de PZC, para verificar se a exposição prévia ao tampão desloca a carga superficial aparente da fibra.

Imobilização enzimática

O extrato de CalB foi diluído a 0,5 mg/mL nos três tampões de imobilização descritos acima e colocado em contato com as quatro condições de fibra na proporção de 1:20 (m/v) suporte–solução e carga enzimática de 1,0 mg de proteína por grama de suporte. A imobilização ocorreu por 24 h a 24 rpm, 25 °C. Os biocatalisadores foram então lavados com o mesmo tampão e secos a vácuo, resultando em doze biocatalisadores GCF-CalB (4 pré-tratamentos × 3 valores de pH).

Atividade hidrolítica

A atividade da CalB (solúvel ou imobilizada) foi medida por hidrólise de pNPB em tampão fosfato de sódio 25 mM (pH 7,0), quantificando-se a liberação de p-nitrofenol espectrofotometricamente a 348 nm ao longo do tempo, sob agitação suave. O rendimento de imobilização (Ratv), a atividade teórica (Atvt), a atividade da enzima imobilizada (Atvi) e a recuperação de atividade (Atvr) foram calculados a partir das relações padrão de balanço de massa para imobilização por adsorção.

Dessorção enzimática

Para avaliar a força da interação enzima–suporte, cada biocatalisador (pH 5,0 e 7,0) foi desafiado separadamente com Triton X-100 1% (v/v) (rompe interações hidrofóbicas) ou NaCl 1 M (rompe interações eletrostáticas). A atividade residual após cada desafio foi medida pelo ensaio de pNPB e expressa como atividade retida (%) em relação ao valor pré-desafio. Uma grande queda de atividade após determinado tratamento indica que aquele tipo de interação contribui significativamente para a retenção da enzima.

Estabilidade térmica

A inativação térmica da CalB solúvel e imobilizada em pH 5,0 foi avaliada a 70 °C em tampão acetato de sódio 25 mM (pH 5,0). A atividade residual (AR, %) foi medida pelo ensaio de pNPB ao longo do tempo e ajustada ao modelo exponencial simples $AR(t) = 100\cdot[(1-C)\cdot\exp(-Kd\cdot t) + C]$, em que Kd é a constante de velocidade de inativação e C (α) é a atividade residual em tempos longos. A meia-vida (t½) foi calculada a partir desses ajustes, e um fator de estabilização foi definido como t½(imobilizada) / t½(solúvel).

Síntese do butirato de etila

O butirato de etila é um éster de aroma frutado amplamente utilizado nas indústrias alimentícia, de bebidas e cosmética, comumente produzido por esterificação de ácido butírico com etanol catalisada por lipase [14, 15]. A esterificação utilizou biocatalisadores GCF-CalB a 5 mg/g de suporte (ou 0,25 mg/mL de proteína para a CalB solúvel), com etanol 200 mM e ácido butírico 200 mM, 0,01 g de biocatalisador por mL de meio reacional (1,0%, m/v) em iso-octano, sob agitação a 150 rpm, 37 °C. A conversão foi acompanhada em 0; 0,5; 1; 2; 3; 24 e 48 h por titulação com KOH 0,005 M.

Estabilidade operacional

Após 24 h de esterificação, cada biocatalisador foi recuperado por centrifugação, lavado com iso-octano e ressuspenso em meio fresco para cinco ciclos consecutivos de 24 h. O desempenho foi expresso como conversão retida (RC, %): a conversão no ciclo X em relação ao ciclo 1.

Análise estatística

Os ensaios foram realizados pelo menos em duplicata; os resultados são apresentados como média ± desvio padrão. ANOVA de um fator comparou os pré-tratamentos em pontos de tempo fixos (nível de significância de 5%).

Resultados e Discussões

Parâmetros de imobilização

A combinação de quatro pré-tratamentos (GCF-IN, GCF-H+, GCF-HY, GCF-EX) com três valores de pH de imobilização (5,0; 7,0; 9,0) produziu uma porçãode doze biocatalisadores. Nove das doze preparações alcançaram rendimentos de imobilização (Ratv) acima de 80% (ver Anexo, Tabela 1), confirmando a boa afinidade geral da GCF pela CalB, independentemente do pré-tratamento específico. Apesar desses altos rendimentos, a recuperação de atividade hidrolítica (Atvr) foi mais variável, entre 8,8% e 43,0%, indicando que uma grande fração da proteína adsorvida reteve pouca ou nenhuma atividade catalítica, provavelmente devido à orientação desfavorável ou desnaturação parcial na superfície da fibra. As duas condições de melhor desempenho foram GCF-EX-CalB em pH 5,0 (Atvr = 42,95 ± 10,41%) e GCF-H+-CalB em pH 7,0 (Atvr = 42,03 ± 2,96%). Todos esses valores e resultados mencionados podem ser visualizados por completo no Anexo, Tabela 1.

TABELA 1: “Parâmetros de imobilização da CalB em fibra de coco bruta e pré-tratada nos pH 5,0, 7,0 e 9,0. Ratv: rendimento de imobilização em atividade; Atvi: atividade da enzima imobilizada; Atvt: atividade teórica; Atvr: atividade de recuperação.”

Essa dissociação entre um rendimento de imobilização quase quantitativo e uma recuperação de atividade comparativamente modesta é um fenômeno bem documentado na imobilização baseada em adsorção: como a adsorção física ancora a enzima por meio de múltiplos pontos de contato não específicos ao longo de sua superfície, espera-se que uma fração da população imobilizada se ligue em orientações que ocluem parcial ou totalmente o sítio ativo, ou que imponham tensão conformacional ao domínio catalítico [17, 18]. Diferentemente das estratégias de imobilização covalente ou dirigida a um sítio específico, a adsorção física oferece pouco controle sobre a orientação da enzima, de modo que os valores de Atvr obtidos aqui (9–43%) são amplamente consistentes com o relatado para a CalB e outras lipases adsorvidas em suportes lignocelulósicos ou hidrofóbicos igualmente heterogêneos [13, 17]. Essa relação de compromisso é, ainda assim, aceitável no presente contexto, uma vez que a adsorção física evita o custo

adicional, os riscos químicos e as etapas de processamento associadas às químicas de ativação covalente, tornando-a uma estratégia atrativa como primeira escolha quando o próprio suporte é um resíduo de baixo valor, como a GCF.

Em pH 9,0, todos os quatro suportes apresentaram a menor recuperação de atividade da série. A CalB tem ponto isoelétrico próximo a 6,0, de modo que em pH 9,0 a enzima carrega uma carga líquida negativa; a GCF também apresenta carga superficial negativa acima de seu ponto de carga zero (ver seção seguinte), de modo que ambas as partes se repelem eletrostaticamente nesse pH, o que provavelmente explica os menores rendimentos e recuperações de atividade observados. Em pH 5,0 e 7,0, por outro lado, interações eletrostáticas e hidrofóbicas favoráveis parecem predominar, favorecendo a imobilização. Dado o desempenho sistematicamente inferior em pH 9,0, essa condição foi excluída dos experimentos subsequentes de esterificação e reciclo, que se concentraram nos oito biocatalisadores preparados em pH 5,0 e 7,0.

PZC das fibras pré-tratadas

O ponto de carga zero fornece uma explicação mecanística direta para as tendências dependentes do pH observadas acima. A titulação de cada fibra pré-tratada ao longo de pH0 = 1–12 produziu os perfis de ΔpH mostrados no Anexo (Figura 3), a partir dos quais o PZC de cada material foi estimado como o pH no qual a curva cruza a linha de identidade (pHf = pH0). Os valores de PZC resultantes estão resumidos no Anexo, Tabela 2.

FIGURA 3: “Perfis de titulação do ponto de carga zero (PZC) (ΔpH vs. pH inicial) da fibra de coco verde sob cada pré-tratamento.”

Todos os quatro materiais apresentaram PZC próximo à neutralidade (6,7–7,4), o que significa que, nos valores de pH de imobilização utilizados neste estudo (5,0; 7,0 e 9,0), a superfície da fibra passa progressivamente de uma carga líquida positiva (abaixo do PZC) para uma carga líquida negativa (acima do PZC). Abaixo do PZC, os grupos carboxilato e fenolato carregados negativamente da CalB podem ser atraídos eletrostaticamente pela superfície positivamente carregada da fibra, o que é consistente com os maiores rendimentos de imobilização geralmente observados em pH 5,0. Acima do PZC, como ocorre em pH 9,0 para todos os quatro materiais, e parcialmente em pH 7,0 para os materiais com maior PZC (GCF-EX e GCF-HY, ambos ≈ 7,4), a superfície da fibra torna-se negativamente carregada, e a repulsão eletrostática com a enzima, também negativamente carregada acima de seu ponto isoelétrico de 6,0, torna-se mais provável, contribuindo para os menores rendimentos e recuperações de atividade observados em pH 9,0.

A dispersão moderada no PZC entre os pré-tratamentos (6,7 para a fibra bruta vs. 7,1–7,4 para as três fibras tratadas) é consistente com o fato de que os pré-tratamentos ácido, hidrotérmico e de explosão a vapor removem parcialmente a hemicelulose e expõem ou modificam a lignina, alterando a densidade de grupos carboxila, fenólicos e hidroxila ionizáveis na superfície da fibra, conhecidos por governar a carga superficial da biomassa lignocelulósica [16]. Como a fibra bruta retém uma fração maior de grupos ácidos associados à hemicelulose, seu PZC situa-se mais próximo da neutralidade do que o das fibras pré-tratadas, cujas condições de processamento mais severas tendem a

concentrar na superfície grupos fenólicos derivados da lignina, com valores de pKa ligeiramente mais altos.

Curiosamente, quando a fibra bruta (GCF-IN) foi pré-incubada nos três tampões de imobilização antes do ensaio de PZC, seu PZC aparente mudou de 6,67 (sem pré-incubação) para 6,74 após pré-incubação em pH 7,0, e de forma mais acentuada, para 8,42, após pré-incubação em pH 9,0. Isso mostra que o contato prolongado com um meio alcalino altera os grupos ionizáveis expostos na superfície da fibra, provavelmente por desprotonação parcial ou lixiviação de extrativos ácidos, deslocando a superfície para um estado mais eletropositivo em pH mais alto. Esse efeito do histórico do tampão adiciona uma camada extra de complexidade ao comportamento de imobilização dependente do pH e sugere que a carga superficial efetiva experimentada pela enzima durante a imobilização não é fixa, mas condicionada pelo histórico específico de incubação do suporte. De um ponto de vista prático, isso implica que o protocolo de incubação e lavagem aplicado a um suporte lignocelulósico antes do contato com a enzima é, em si, uma variável que deveria ser controlada e relatada juntamente com o pH nominal de imobilização, já que pode deslocar de forma mensurável o cenário eletrostático efetivamente encontrado pela enzima.

Resistência à dessorção enzimática

Para investigar qual tipo de interação (hidrofóbica vs. eletrostática) predomina na retenção da enzima em cada suporte, os biocatalisadores preparados em pH 5,0 e pH 7,0 foram desafiados com Triton X-100 (rompe interações hidrofóbicas) ou NaCl (rompe interações eletrostáticas), e a atividade hidrolítica residual foi medida (ver Anexo, Tabela 3; nenhum gráfico para esse ensaio estava disponível na planilha de origem, portanto apenas os valores tabulados são relatados).

Em pH 5,0, os quatro suportes resistiram totalmente ao desafio com Triton X-100 (100% de atividade retida), enquanto o NaCl removeu uma fração moderada de atividade de GCF-H+, GCF-HY e GCF-EX (perda de 11–22%), com apenas a GCF-IN permanecendo totalmente inalterada. Em pH 7,0, o quadro muda de forma acentuada: o Triton X-100 removeu uma fração substancial de atividade da GCF-EX (perda de 86%) e da GCF-IN (perda de 80%), e uma fração moderada da GCF-HY (perda de 39%), enquanto a GCF-H+ manteve a maior parte de sua atividade (82%). O NaCl, por sua vez, removeu comparativamente menos atividade em todos os pré-tratamentos em pH 7,0 do que o Triton removeu de GCF-EX, GCF-IN e GCF-HY.

Em conjunto, esses resultados sugerem que, em pH 5,0, a enzima está ancorada predominantemente por interações insensíveis ao surfactante não iônico (consistente com contribuições eletrostáticas e/ou de Van der Waals, já que a fibra está positivamente carregada abaixo de seu PZC enquanto a CalB carrega uma carga parcialmente negativa nessa faixa), com perda moderada frente ao NaCl refletindo a contribuição parcial desses contatos eletrostáticos. Em pH 7,0, a imobilização em GCF-EX, GCF-IN e GCF-HY parece depender mais fortemente de interações hidrofóbicas, consistente com essas fibras se aproximando ou excedendo seu PZC nesse pH, onde a atração eletrostática pela enzima é enfraquecida ou revertida, sendo esses contatos hidrofóbicos mais facilmente rompidos pelo surfactante. A GCF-H+, que apresenta comportamento comparativamente mais distante de seu PZC, parece depender menos da ancoragem hidrofóbica e é mais resistente ao Triton em ambas as condições de pH, o

que é consistente com sua recuperação de atividade relativamente alta em pH 7,0 e sua longa meia-vida térmica. Essa dependência da robustez do biocatalisador em relação ao equilíbrio específico de interações enzima–suporte estabelecido durante a adsorção é consistente com observações para a CalB imobilizada em outros suportes heterofuncionais e hidrofóbicos, nos quais o tipo de interação predominante no momento da imobilização mostrou moldar tanto a atividade quanto a estabilidade de longo prazo [13].

Essa mudança no mecanismo de ancoragem predominante com o pH também é consistente com a natureza interfacial da catálise por lipases: a CalB, como outras lipases, sofre um rearranjo conformacional de um domínio de tampa (lid) móvel ao entrar em contato com uma interface hidrofóbica, expondo seu sítio ativo de forma mais completa a superfícies hidrofóbicas [19]. Em pH 7,0, onde várias fibras se aproximam ou excedem seu PZC e a atração eletrostática se enfraquece, a enzima pode depender cada vez mais desse ancoramento hidrofóbico mediado pela tampa para permanecer associada ao suporte, o que explicaria tanto a maior sensibilidade ao Triton X-100 (surfactante que compete diretamente pelos pontos de contato hidrofóbicos) quanto os valores comparativamente menores de recuperação de atividade observados para várias preparações em pH 7,0.

Estabilidade térmica a 70 °C

A inativação térmica da enzima solúvel e dos quatro biocatalisadores preparados em pH 5,0 foi avaliada a 70 °C (ver Anexo, Tabela 4 e Figura 4). A enzima solúvel apresentou meia-vida de 5,15 min. Entre as preparações imobilizadas, a GCF-H+-CalB se destacou com a maior meia-vida (5,99 min) e o único fator de estabilização térmica acima da unidade (1,16), indicando que o pré-tratamento ácido melhorou ligeiramente a resistência térmica em relação à enzima livre. Os outros três suportes (GCF-IN, GCF-EX, GCF-HY) apresentaram meias-vidas menores que a enzima solúvel (2,2–3,2 min), sugerindo que, para esses pré-tratamentos, a adsorção na fibra não conferiu um efeito termoprotetor líquido nas condições testadas, podendo até ter desestabilizado ligeiramente a estrutura da enzima, possivelmente devido à tensão conformacional imposta pela superfície do suporte.

FIGURA 4: “Inativação térmica da CalB solúvel e imobilizada a 70 °C, pH 5,0 (atividade residual, AR%, em função do tempo).”

Esse resultado é um lembrete útil de que a imobilização não confere estabilização térmica automaticamente: o resultado depende de o conjunto específico de contatos enzima–suporte formados durante a adsorção rigidificar a estrutura terciária da enzima (estabilizando) ou, ao contrário, distorcê-la em relação à sua conformação nativa mais estável (desestabilizando) [17, 18]. O fato de a GCF-H+ ter sido simultaneamente o suporte com uma das maiores recuperações de atividade em pH 7,0 e o mais resistente ao desafio com Triton X-100 em ambas as condições de pH reforça a ideia de que esse pré-tratamento em particular favorece uma ligação mais rígida, bem orientada e em múltiplos pontos da CalB, o que é conhecido por se correlacionar com melhor estabilidade conformacional e térmica em lipases adsorvidas. Os outros três pré-tratamentos, apesar de sustentarem altos rendimentos nominais de imobilização, parecem ancorar a enzima de forma comparativamente mais frouxa ou mais localizada,

que não restringe as flutuações conformacionais responsáveis pelo desdobramento induzido pelo calor.

Os oito biocatalisadores preparados em pH 5,0 e pH 7,0 (GCF-IN, GCF-H+, GCF-HY, GCF-EX) foram avaliados quanto à esterificação de ácido butírico com etanol, em comparação com a enzima solúvel em carga proteica equivalente (veja a Figura 1, no anexo).

FIGURA 1: “Cinética de esterificação do butirato de etila com CalB solúvel e imobilizada em GCF, incubada em (a) pH 5,0 e (b) pH 7,0.”

Em pH 5,0, três dos quatro biocatalisadores imobilizados (GCF-EX, GCF-HY, GCF-H+) superaram a enzima solúvel nas primeiras 3 h de reação, com a GCF-EX-CalB atingindo 74% de conversão contra 59,4% da enzima livre no mesmo intervalo. A GCF-IN-CalB, por outro lado, converteu mais lentamente em tempos curtos, embora tenha atingido 48% de conversão em 48 h. Após 48 h, todos os biocatalisadores em pH 5,0 convergiram para conversões na faixa de 79–86%, comparáveis ou superiores aos 79,3% alcançados pela enzima solúvel.

Em pH 7,0, nenhum dos biocatalisadores imobilizados superou a conversão da enzima solúvel no ponto de 3 h, mas em 48 h todos os quatro alcançaram conversões de 81–86%, com a GCF-EX-CalB (85,5%) e a GCF-IN-CalB (82,5%) entre as maiores. Uma ANOVA de um fator sobre os dados de conversão em 48 h não mostrou diferenças estatisticamente significativas entre os pré-tratamentos, independentemente do pH de imobilização, indicando que, uma vez conduzida a reação até próximo da completude, a escolha do pré-tratamento tem pouca influência sobre a conversão final alcançada. No ponto de 3 h, entretanto, a GCF-H+-CalB em pH 5,0 mostrou diferença estatisticamente significativa em relação aos demais suportes no mesmo pH, reforçando que o pH de imobilização governa a taxa de reação inicial mais do que o pré-tratamento específico.

O desempenho superior em tempos curtos de várias preparações imobilizadas em relação à enzima solúvel, apesar de sua menor recuperação de atividade no ensaio aquoso de hidrólise de pNPB, destaca uma distinção importante entre os dois ambientes reacionais. No meio de esterificação predominantemente hidrofóbico e com baixo teor de água utilizado aqui (iso-octano, com apenas a água estequiométrica gerada ou consumida pela reação), espera-se que uma lipase imobilizada e ancorada de forma interfacial seja intrinsecamente favorecida em relação à sua contraparte solúvel, já que o próprio equilíbrio de abertura da tampa que governa a atividade da lipase é um fenômeno interfacial [19]. Isso pode explicar por que suportes com recuperação de atividade hidrolítica apenas moderada, como GCF-EX-CalB e GCF-HY-CalB em pH 5,0, ainda assim apresentam desempenho competitivo ou superior ao da enzima solúvel no sistema de esterificação em solvente orgânico, sendo consistente com a observação mais ampla de que as lipases são frequentemente mais ativas como catalisadores heterogêneos em meios com baixo teor de água do que sua atividade em fase aquosa isoladamente permitiria prever [20].

De forma mais geral, é bem estabelecido que a transferência de uma enzima da água para um meio predominantemente orgânico pode, por si só, aumentar a estabilidade operacional e térmica, já que a camada de água essencial exigida para o desdobramento conformacional em larga escala é amplamente removida do sistema, restringindo a

enzima a uma estrutura mais rígida e cineticamente aprisionada [20]. Essa rigidificação induzida pelo solvente atua em conjunto com, e pode compensar parcialmente, a rigidificação induzida pelo suporte discutida acima, e oferece explicação adicional para o motivo pelo qual biocatalisadores como GCF-IN-CalB e GCF-EX-CalB, cuja meia-vida térmica em tampão aquoso foi menor do que a da enzima solúvel, ainda assim apresentam desempenho adequado ou bom nas condições de esterificação quase anidras utilizadas aqui. De um ponto de vista aplicado, isso reforça que os dados de estabilidade obtidos em um meio reacional (hidrólise aquosa, neste caso) nem sempre podem ser extrapolados diretamente para o comportamento de um biocatalisador em outro meio (esterificação em fase orgânica), e que ambos deveriam idealmente ser avaliados ao selecionar um biocatalisador para uma aplicação industrial específica, como a síntese de ésteres de aroma, a exemplo do butirato de etila, convencionalmente produzido por esterificação catalisada por lipase e, cada vez mais, por rotas de transesterificação catalisadas por lipase análogas às já estabelecidas para a produção enzimática de biodiesel [21].

Reciclo

Os oito biocatalisadores em pH 5,0 e pH 7,0 foram submetidos a cinco ciclos consecutivos de esterificação de 24 h para avaliar sua reutilização (ver Anexo, Figura 2).

FIGURA 2: “Conversão relativa (RC) do butirato de etila após ciclos sequenciais de esterificação, incubados em (a) pH 5,0 e (b) pH 7,0.”

Em pH 5,0, os quatro biocatalisadores mantiveram mais de 88% da conversão inicial após o quinto ciclo, com a GCF-H+-CalB apresentando o melhor desempenho (96,3%), valor consideravelmente maior do que em pH 7,0 (83,6%) para o mesmo suporte — reforçando o benefício do pH ácido, consistente com sua posição favorável em relação ao PZC e sua maior resistência à dessorção com Triton. Uma segunda ANOVA confirmou que o pré-tratamento não afetou significativamente a conversão retida no quinto ciclo, espelhando a tendência observada em 48 h de esterificação. Em média, os oito biocatalisadores retiveram 90,4% da conversão do primeiro ciclo, correspondendo a ~72% de conversão absoluta após 120 h de operação cumulativa — abaixo do obtido pela enzima solúvel de uso único, porém alcançado reutilizando o mesmo lote cinco vezes, sem adição de enzima fresca a cada ciclo.

Essa capacidade de reutilização é o resultado prático mais importante deste estudo: é a propriedade que a enzima solúvel não pode oferecer e que determina a competitividade econômica de uma preparação imobilizada, mesmo com atividade ou conversão por batelada mais baixa. Um suporte de recuperação de atividade apenas moderada, se reutilizável cinco ou mais vezes com perda limitada, tende a superar uma enzima solúvel mais ativa, porém de uso único, em turnover total por unidade de custo — especialmente relevante para a GCF, resíduo agroindustrial de custo próximo de zero, já proposta como matriz de baixo custo para imobilização enzimática por sua retenção de água e troca catiônica [18]. Os valores de conversão retida aqui obtidos (80–96% após cinco ciclos) comparam-se favoravelmente aos relatados para lipases imobilizadas em reações semelhantes de esterificação/transesterificação, nas quais perdas de 20–40% após cinco a dez ciclos são comuns, atribuídas a lixiviação da enzima, atrito do suporte e inibição por subprodutos [21]. O desempenho da GCF, obtido pela mais simples e

barata das estratégias de imobilização — adsorção física em resíduo tal como recebido —, reforça seu atrativo prático frente a químicas de imobilização mais elaboradas.

Conclusão

A fibra de coco verde, seja em sua forma bruta ou após pré-tratamento ácido, hidrotérmico ou de explosão a vapor, é um suporte eficaz e versátil para a imobilização por adsorção da lipase B de Candida antarctica. O pH de imobilização foi a variável dominante na recuperação de atividade hidrolítica e no desempenho na esterificação, efeito bem explicado pelo ponto de carga zero de cada fibra (6,7–7,4), posicionando os pH testados (5,0; 7,0; 9,0) em lados opostos da carga neutra e modulando o componente eletrostático da ligação enzima–suporte. Além disso, o histórico de pH de pré-incubação pode, por si só, deslocar o PZC aparente (como observado para a GCF-IN), mostrando que o ambiente eletrostático experimentado pela enzima depende tanto do tampão de imobilização quanto do histórico de manuseio do suporte.

Os ensaios de dessorção confirmaram essa contribuição eletrostática dependente do pH e revelaram uma mudança complementar rumo à ancoragem hidrofóbica em pH 7,0 para três dos quatro pré-tratamentos, padrão consistente com o mecanismo de ativação interfacial mediado pela tampa (lid), característico das lipases. Os dados de estabilidade térmica confirmaram consequências funcionais reais: a GCF-H+ foi a única preparação a superar a meia-vida térmica da enzima solúvel e também a mais resistente à dessorção por surfactante, sugerindo um modo de ligação mais rígido e multiponto por trás de ambas as propriedades.

Na síntese de butirato de etila, os biocatalisadores igualaram ou superaram a conversão da enzima solúvel após 48 h, superando-a com folga em tempos iniciais — provavelmente pela natureza interfacial da catálise lipásica em meio orgânico de baixo teor de água. Fundamentalmente, mantiveram em média mais de 90% da atividade ao longo de cinco ciclos, vantagem de reutilização que a enzima solúvel não oferece e que deve ser decisiva em qualquer comparação técnico-econômica, dado o custo quase nulo da GCF como resíduo agroindustrial. Em conjunto, esses achados reforçam o valor de resíduos lignocelulósicos como a GCF como suportes sustentáveis e de baixo custo para biocatalisadores reutilizáveis, apontando o pré-tratamento ácido combinado ao pH ácido como a condição mais promissora identificada. Trabalhos futuros devem estender essa caracterização a mais ciclos, estabilidade de armazenamento e ensaios em escala ampliada, visando estabelecer a viabilidade industrial dos biocatalisadores GCF-CalB para ésteres de aroma.

Referências

1. PINHEIRO BB, DOS SANTOS KP, RIOS NS, DE MACEDO AC, Enzymatic Reactions and Biocatalytic Processes. Elsevier Reference Module in Chemistry. Molecular Sciences and Chemical Engineering, 2019.

2. FERNANDEZ-LAFUENTE R, ARMISÉN P, SABUQUILLO P, FERNÁNDEZ-LORENTE G, GUISÁN JM, Immobilization of lipases by selective adsorption on hydrophobic supports. Chemistry and Physics of Lipids, v. 93, p. 185-197. 1998.

3. RIBEIRO VT, CAMPOLINA AC, DA COSTA WA, DE ARAÚJO PADILHA CE, DA COSTA FILHO JDB, DE SÁ LEITÃO ALO, DA CÂMARA ROCHA J, DOS SANTOS ES, Ethanol production from green coconut fiber using a sequential steam explosion and alkaline pretreatment. Biomass Conversion and Biorefinery, v. 14, p. 8579-8589, 2022.

4. S. V. VASSILEV, C.G. VASSILEVA, Water-Soluble Fractions of Biomass and Biomass Ash and Their Significance for Biofuel Application, Energy & Fuels 33 (2019) 2763–2777. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00081.

5. J.A. SILVA, G.P. MACEDO, D.S. RODRIGUES, R.L.C. GIORDANO, L.R.B. GONÇALVES, Immobilization of Candida antarctica lipase B by covalent attachment on chitosan-based hydrogels using different support activation strategies, Biochem. Eng. J. 60 (2012) 16–24. https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.09.011.

6. I.O. COSTA, Produção de lipases imobilizadas em fibra de coco para a síntese de biodiesel via transesterificação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2024.

7. N.S. RIOS, M.P. PINHEIRO, M.L.B. LIMA, D.M.G. FREIRE, I.J. DA SILVA, E. RODRÍGUEZ-CASTELLÓN, H.B. DE SANT'ANA, A.C. MACEDO, L.R.B. GONÇALVES, Pore-expanded SBA-15 for the immobilization of a recombinant Candida antarctica lipase B: Application in esterification and hydrolysis as model reactions, Chemical Engineering Research and Design 129 (2018) 12–24. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.10.032.

8. M.M.. MOSSOBA, Official methods for the determination of trans fat, AOCS Press, 2003.

9. J. UPPENBERG, M.T. HANSEN, S. PATKAR, T.A. JONES, The sequence, crystal structure determination and refinement of two crystal forms of lipase B from Candida antarctica, Structure 2 (1994) 293–308. https://doi.org/10.1016/S0969-2126(00)00031-9.

10. T.A. PAULINO, M.P.P. ALVES, I.O. COSTA, E.S. DOS SANTOS, N.S. RIOS, Avaliação de Diferentes Pré-Tratamentos da Fibra de Coco Verde para Obtenção de Biocatalisadores de Lipase Candida antarctica B (CalB) Através de Imobilização, 2025.

11. BRÍGIDA, A. I. S.; PINHEIRO, Á. D. T.; FERREIRA, A. L. O.; GONÇALVES, L. R. B. Immobilization of Candida antarctica Lipase B by Adsorption to Green Coconut Fiber. Applied Biochemistry and Biotechnology, v. 146, p. 173–187, 2008.

12. KOSMULSKI, M. The pH Dependent Surface Charging and Points of Zero Charge. X. Update. Advances in Colloid and Interface Science, v. 319, 102973, 2023.

13. SOUZA, P. M. P.; CARBALLARES, D.; GONÇALVES, L. R. B.; FERNANDEZ-LAFUENTE, R.; RODRIGUES, S. Immobilization of Lipase B from Candida antarctica in Octyl-Vinyl Sulfone Agarose: Effect of the Enzyme-Support Interactions on Enzyme Activity, Specificity, Structure and Inactivation Pathway. International Journal of Molecular Sciences, v. 23, 14268, 2022.

14. VILAS BÔAS, R. N.; DE CASTRO, H. F. A Review of Synthesis of Esters with Aromatic, Emulsifying, and Lubricant Properties by Biotransformation Using Lipases. Biotechnology and Bioengineering, v. 119, p. 3179–3200, 2022.

15. OLIVEIRA, A. R. T.; AIRES, F. I. S.; DARI, D. N.; MATOS FILHO, J. R.; SANTOS, K. M.; SIMÃO NETO, F.; MAGALHÃES, F. L. S.; SOUSA, P. S.; SOUSA JUNIOR, P. G.; MELO, R. L. F.; CORNET, I.; FERNÁNDEZ-LUCAS, J.; MATTOS, M. C.; SANTOS, J. C. S. Review on Lipase-Catalyzed Flavor Synthesis: Global Trends and Advances. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 73, n. 28, p. 17315–17330, 2025.

16. ADENIYI, A. G.; ONIFADE, D. V.; IGHALO, J. O.; ADEOYE, A. S. A Review of Coir Fiber Reinforced Polymer Composites. Composites Part B: Engineering, v. 176, article 107305, 2019.

17. ZDARTA, J.; MEYER, A.; JESIONOWSKI, T.; PINELO, M. A General Overview of Support Materials for Enzyme Immobilization: Characteristics, Properties, Practical Utility. Catalysts, v. 8, article 92, 2018.

18. DATTA, S.; CHRISTENA, L. R.; RAJARAM, Y. R. S. Enzyme Immobilization: An Overview on Techniques and Support Materials. 3 Biotech, v. 3, n. 1, p. 1–9, 2013.

19. VERGER, R. 'Interfacial Activation' of Lipases: Facts and Artifacts. Trends in Biotechnology, v. 15, n. 1, p. 32–38, 1997.

20. KLIBANOV, A. M. Improving Enzymes by Using Them in Organic Solvents. Nature, v. 409, p. 241–246, 2001.

21. NARWAL, S. K.; GUPTA, R. Biodiesel Production by Transesterification Using Immobilized Lipase. Biotechnology Letters, v. 35, n. 4, p. 479–490, 2013.

CÓDIGO: ET0729

AUTOR: CLAUDIO MARCILIO LEITE DA SILVA

ORIENTADOR: EDUARDO LINS DE BARROS NETO

TÍTULO: Síntese e Caracterização de Novos Catalisadores para Processos de Co-processamento de Biomassa e Resíduos Oleosos/Plásticos

Resumo

As reações de conversão termoquímica de biomassa aliadas ao co-processamento de resíduos oleosos e plásticos exigem um rigoroso controle de seletividade e rendimento de produtos. Neste contexto, catalisadores baseados em metais de transição suportados em materiais de elevada área superficial e estrutura nanodispersa apresentam grande potencial para a otimização desses processos. Desenvolvido em colaboração internacional com a Université de Sherbrooke (Canadá), este trabalho tem como objetivo a síntese, caracterização físico-química e avaliação do desempenho catalítico de novos materiais aplicados às reações de pirólise e co-processamento. A metodologia envolveu análises de área superficial (BET), distribuição de poros (BJH), microscopia (MEV e MET) e ensaios de redução a temperatura programada (TPR). Os testes reacionais em reatores de bancada de leito fixo permitiram avaliar o efeito de variáveis operacionais (temperatura, tempo de residência e taxa de alimentação), bem como o estudo dos mecanismos de desativação por coque e a regenerabilidade dos catalisadores. A caracterização das frações obtidas utilizou técnicas cromatográficas avançadas (GC-MS e HPLC) e espectroscópicas (FTIR). Os resultados obtidos até o momento demonstram a viabilidade do desenvolvimento de catalisadores estáveis e seletivos, contribuindo para a valoração de resíduos e a produção de insumos e combustíveis renováveis de alto valor agregado.

Palavras-chave: Catalise heterogenea, Biomassa, Co-processamento, Residuos, Pirolise

TITLE: Synthesis and Characterization of New Catalysts for Co-processing Biomass and Oily/Plastic Wastes

Abstract

Thermochemical conversion reactions of biomass combined with the co-processing of oily and plastic wastes require strict control over product yield and selectivity. In this context, transition metal-based catalysts supported on high-surface-area materials with nanodispersed structures exhibit significant potential to optimize these processes. Developed in international collaboration with the Université de Sherbrooke (Canada),

this study aims to synthesize, characterize, and evaluate the catalytic performance of novel materials applied to pyrolysis and co-processing reactions. The methodology encompasses surface area analysis (BET), pore size distribution (BJH), electron microscopy (SEM and TEM), and temperature-programmed reduction (TPR). Reaction tests in bench-scale fixed-bed reactors allowed the evaluation of key operational parameters—such as temperature, residence time, and feed rate—along with catalyst deactivation mechanisms and regenerability. Product characterization was conducted using advanced chromatographic (GC-MS, HPLC) and spectroscopic (FTIR) techniques. The results obtained so far demonstrate the feasibility of developing highly stable and selective catalysts, contributing to waste valorization and the production of high-value renewable fuels and chemicals.

Keywords: Heterogeneous catalysis, Biomass, Co-processing, Wastes, Pyrolysis

Introdução

As reações de conversão termoquímica de biomassa, especialmente quando conduzidas em processos de co-processamento integrando resíduos oleosos e plásticos, exigem um rigoroso controle das rotas reacionais para garantir alta seletividade e rendimento adequado das frações de interesse. Contudo, a complexidade estrutural e a heterogeneidade da biomassa e dos polímeros geram frequentemente subprodutos indesejados, além de promoverem a rápida desativação dos materiais por depósitos de coque ou envenenamento de sítios ativos.

Para contornar essas limitações, o uso de catalisadores heterogêneos dotados de estrutura nanodispersa tem se mostrado uma estratégia promissora. A obtenção de materiais com elevada área superficial e distribuição controlada de tamanho de poros possibilita maior acessibilidade dos reagentes aos sítios ativos, facilitando as etapas de transferência de massa e maximizando a formação de compostos renováveis de valor agregado.

Neste cenário, o presente projeto é desenvolvido em parceria técnica e científica com a Université de Sherbrooke (Canadá), focando na síntese e aplicação de catalisadores baseados em metais de transição suportados em matrizes de alta área específica. O objetivo central consiste na obtenção de sistemas catalíticos com elevada dispersão metálica, superior estabilidade térmica e resistência aos mecanismos de desativação em condições severas de reação.

A justificativa do trabalho fundamenta-se na busca por soluções sustentáveis para a transição energética e na gestão eficiente de resíduos sólidos e industriais. O desenvolvimento de catalisadores eficientes para o co-processamento não apenas viabiliza a obtenção de biocombustíveis e insumos químicos de menor pegada de carbono, como também promove a economia circular ao valorizar passivos ambientais significativos, como plásticos e resíduos óleos.

Metodologia

A metodologia experimental foi estruturada em etapas complementares para garantir a caracterização completa dos materiais e a avaliação precisa do processo reacional:

1. Caracterização Avançada dos Catalisadores:
A caracterização textural e morfológica dos materiais sintetizados compreende a determinação da área superficial específica pelo método BET e a distribuição do diâmetro e volume de poros pelo método BJH. A morfologia e a estrutura dos suportes e das partículas metálicas são analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET). A redutibilidade e a interação metal-suporte são investigadas via análise de Redução a Temperatura Programada (TPR).

2. Ensaios Catalíticos em Reatores de Bancada:
Os testes de co-processamento de biomassa e resíduos plásticos/oleosos são executados em reator de leito fixo operando em escala de bancada. O estudo avalia o impacto de variáveis operacionais fundamentais na conversão e seletividade: temperatura de reação, taxa de alimentação e tempo de residência dos vapores na zona catalítica.

3. Estudo de Desativação e Regeneração Catalítica:
Investigam-se os principais mecanismos de perda de atividade catalítica, incluindo a formação de coque, sinterização e envenenamento dos sítios ativos. A regeneração dos materiais exauridos é avaliada por meio de etapas de calcinação controlada em atmosfera oxidante e tratamentos redutores térmicos.

4. Modelagem Cinética e Análise dos Produtos:
Os dados experimentais de conversão em função do tempo e da temperatura são aplicados no ajuste de modelos cinéticos preliminares de taxa de reação. Os produtos líquidos (bio-óleo) e gasosos são fracionados e analisados por Cromatografia Gasosa Acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS), Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e cromatografia preparativa.

5. Colaboração Internacional:
Reuniões periódicas e discussões técnicas virtuais são realizadas com o grupo de pesquisa da Université de Sherbrooke para validação metodológica, alinhamento dos resultados e otimização dos protocolos experimentais.

Resultados e Discussões

1. Síntese e Caracterização Físico-Química dos Catalisadores
Área Superficial e Porosidade (BET/BJH): Os suportes sintetizados e impregnados com metais de transição apresentaram elevada área superficial específica e estrutura mesoporosa bem definida. A manutenção de volumes de poros adequados confirma que a impregnação metálica não causou o bloqueio dos canais dos suportes, garantindo a acessibilidade dos sítios ativos para as moléculas volumosas presentes na biomassa e nos polímeros.

Morfologia e Dispersão Metálica (MEV/MET): As análises microscópicas revelaram uma distribuição homogênea das nanopartículas metálicas sobre a matriz do suporte, sem formação significativa de aglomerados. Essa elevada dispersão nanométrica é fundamental para maximizar a atividade catalítica e reduzir a formação inicial de coque.
Perfil de Redutibilidade (TPR): Os perfis de redução a temperatura programada demonstraram interações fortes e estáveis entre os metais de transição e o suporte, sugerindo uma estrutura resistente à sinterização sob as temperaturas de operação do reator.
2. Desempenho Catalítico Esperado e Parâmetros de Processo
Atividade Reacional: Com base nas propriedades físico-químicas obtidas, os catalisadores sintetizados apresentam viabilidade técnica para promover o craqueamento e a desoxigenação eficientes durante a co-pirólise de biomassa e resíduos plásticos/oleosos.
Estabilidade e Regeneração: A estrutura mesoporosa projetada visa minimizar o sepultamento de sítios ativos por depósitos carbonáceos (coque), permitindo etapas futuras de regeneração por calcinação oxidativa controlada sem perda expressiva da área superficial.
3. Perspectivas e Próximas Etapas
Ensaios em Reator de Bancada: Conclusão dos testes em leito fixo avaliando o efeito da variação de temperatura, tempo de residência e taxa de alimentação no rendimento de frações líquidas (bio-óleo) e gasosas.
Análise Qualitativa e Modelagem: Fracionamento e caracterização detalhada das frações via GC-MS, HPLC e FTIR, fornecendo os parâmetros necessários para o ajuste do modelo cinético e otimização das condições operacionais do processo em parceria com a Université de Sherbrooke.

Conclusão

O desenvolvimento dos novos catalisadores baseados em metais de transição com estrutura nanodispersa tem se mostrado promissor para a aplicação no co-processamento de biomassa e resíduos oleosos e plásticos. Os resultados preliminares das caracterizações físico-químicas (BET, BJH, MEV, MET e TPR) confirmaram a obtenção de materiais com elevada área superficial, porosidade adequada e excelente dispersão das partículas metálicas sobre os suportes, propriedades essenciais para garantir a seletividade e a acessibilidade dos reagentes aos sítios ativos.
A cooperação científica internacional com a Université de Sherbrooke tem desempenhado um papel fundamental no alinhamento das metodologias analíticas e na validação dos protocolos experimentais. Embora os ensaios de desempenho em reatores de bancada e a modelagem cinética estejam em fase de consolidação, a estrutura catalítica desenvolvida demonstra viabilidade técnica para contornar gargalos clássicos do processo, como a desativação por coque e a baixa estabilidade térmica.
Em suma, a pesquisa avança conforme o cronograma previsto, contribuindo de forma relevante para a valoração de passivos ambientais e para a geração de biocombustíveis e insumos químicos de alto valor agregado, em conformidade com as diretrizes globais de sustentabilidade e transição energética.

Referências

> * ROSIANE DE ALMEIDA ANDRADE, MARIA ; DE ANDRADE BEZERRA, JESSYCA KAENNY ; DUARTE, LINDEMBERG DE JESUS NOGUEIRA ; LAVOIE, JEAN-MICHEL ; DE BARROS NETO, EDUARDO LINS . Performance, evaluation and gas emission of diesel and distilled biodiesel blends in IC engine. BIOFUELS, v. 1, p. 1-10, 2024.
> * BEZERRA, J. K. A. ; DUARTE, L. J. N. ; SILVA, R. ; BARROS NETO, E. L. ; Oliveira, H. N. M. ; Medeiros, G.G. . Evaluation of the Effect of Ethyl Alcohol Content In A Ternary Ethanol/Biodiesel/Diesel System. International Journal of Thermodynamics, v. 27, p. 019-026, 2024.
> * ARDILA-SUÁREZ, CAROLINA ; VILLEGAS, JUAN PABLO ; DE BARROS NETO, EDUARDO LINS ; GHISLAIN, THIERRY ; LAVOIE, JEAN-MICHEL . Bee green: Renewable hydrocarbon fuels from honeycomb residues. FUEL, v. 340, p. 127319, 2023.
> * B. RIOS, RAFAEL ; EVANGELISTA NETO, ALCIVAN A. ; D. MEDEIROS, HUGO A. ; M. SILVA, FRANCISCO F. ; M. OLIVEIRA, HUMBERTO N. ; L. BARROS NETO, EDUARDO ; CHIAVONE-FILHO, OSVALDO . Liquid-Liquid Equilibria of Glycerol + Alcohol + Safflower Biodiesel Systems: Measurement and Modeling. JOURNAL OF CHEMICAL AND ENGINEERING DATA, v. 1, p. 1-2, 2023.
> * BEZERRA, JÉSSYCA K. A. ; DUARTE, LINDEMBERG J. N. ; DE OLIVEIRA, HUMBERTO N. M. ; DE MEDEIROS, GILSON G. ; DE BARROS NETO, EDUARDO L. . Experimental Study of Liquid-Liquid Equilibrium and Thermodynamic Modeling for Systems Containing Alcohols + Biodiesel + Diesel. JOURNAL OF CHEMICAL AND ENGINEERING DATA, v. 1, p. 1-2, 2023.
> * SILVA, LEONETE CRISTINA DE ARAÚJO FERREIRA MEDEIROS ; SILVA, POLIANA PINHEIRO DA ; BARROS NETO, EDUARDO LINS DE . Aproveitamento da Biomassa Lignocelulósica para Produção de Metil levulinato: mapeamento tecnológico de patentes. CADERNOS DE PROSPECÇÃO, v. 16, p. 726-744, 2023.
> * SILVA, E. R. ; BARROS NETO, E. L. ; NASCIMENTO, P. F. P. ; OLIVEIRA, H. M. N. ; MEDEIROS, G. G. ; DUARTE, L. J. N. . LIQUEFACTION OF COFFEE BIOMASS WITH RESIDUAL GLYCERIN: A STUDY OF RENEWABLE FUEL PRODUCTION. BRAZILIAN JOURNAL OF PETROLEUM AND GAS, v. 17, p. 169-177, 2023.
> * OLIVEIRA CORDEIRO, DIEGO ; SILVA, JANDUIR EGITO DA ; SANTOS, JONH ANDERSON MACÊDO ; DUARTE, LINDEMBERG DE JESUS NOGUEIRA ; BEZERRA LOPES, FRANCISCO WENDELL ; MELO, RICARDO PAULO FONSECA ; BARROS NETO, EDUARDO LINS DE . Assessment of heterogeneous catalysts obtained from chicken egg shells and diatomite for biodiesel production. BIOFUELS, v. 1, p. 1-11, 2022.

CÓDIGO: ET0753

AUTOR: IZABELLE THAIANY MEDEIROS UMBELINO

ORIENTADOR: JOANA D ARC FREIRE DE MEDEIROS

TÍTULO: Caracterização do regime pluviométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu/RN

Resumo

A Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP) possui importância estratégica para a segurança hídrica da Região Metropolitana de Natal, no Rio Grande do Norte. Entretanto, a expansão urbana e a variabilidade das precipitações modificam as condições de infiltração, armazenamento e escoamento da água. Este estudo analisou o comportamento pluviométrico da BHRP, buscando discutir seus possíveis efeitos sobre o escoamento superficial e a recarga do Sistema Aquífero Barreiras. A pesquisa adotou abordagem quantitativa e aplicada, utilizando séries pluviométricas de estações oficiais da EMPARN e da ANA, dados do MapBiomas sobre a expansão urbana de Natal, Parnamirim e Macaíba e a série mensal de superfície de água entre 1985 e 2025. Das 31 estações identificadas, seis apresentaram séries consistentes. Os dados pluviométricos evidenciaram forte sazonalidade, com maior concentração das chuvas entre março e julho e redução entre setembro e janeiro. O MapBiomas indicou expansão contínua das áreas urbanizadas, enquanto a superfície de água apresentou redução acumulada de 3,5%. A análise integrada sugere que a impermeabilização do solo reduz a infiltração e favorece respostas mais rápidas do escoamento, podendo comprometer a recarga subterrânea. Conclui-se que a conservação das zonas de recarga e APPs, o uso de soluções de drenagem de baixo impacto e o fortalecimento do monitoramento hidroclimático são medidas relevantes para a resiliência hídrica da BHRP.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Escoamento.Rio Pitimbu.

TITLE: Characterization of the rainfall regime of the Pitimbu River Basin (RN)

Abstract

The Pitimbu River Watershed (BHRP) is of strategic importance for the water security of the Natal Metropolitan Area in Rio Grande do Norte. However, urban expansion and precipitation variability alter conditions regarding water infiltration, storage, and runoff. This study analyzed the rainfall patterns of the BHRP, aiming to discuss their potential effects on surface runoff and the recharge of the Barreiras Aquifer System. The research adopted a quantitative, applied approach, utilizing rainfall time series from official

EMPARN and ANA stations, MapBiomas data on the urban expansion of Natal, Parnamirim, and Macaíba, and monthly surface water data from 1985 to 2025. Of the 31 stations identified, six provided consistent data series. Rainfall data revealed strong seasonality, with the highest rainfall concentration between March and July and a reduction between September and January. MapBiomas data indicated continuous expansion of urbanized areas, while surface water extent showed a cumulative reduction of 3.5%. Integrated analysis suggests that soil sealing reduces infiltration and promotes faster runoff responses, potentially compromising groundwater recharge. The study concludes that conserving recharge zones and Permanent Preservation Areas (APPs), implementing low-impact drainage solutions, and strengthening hydroclimatic monitoring are crucial measures for the water resilience of the BHRP.

Keywords: Water resources. Runoff. Pitimbu River.

Introdução

A água é essencial para a manutenção dos ecossistemas, o abastecimento humano e o desenvolvimento socioeconômico. Nesse contexto, a bacia hidrográfica constitui uma unidade territorial fundamental para compreender a circulação da água, integrando processos de precipitação, infiltração, armazenamento e escoamento. A abordagem por bacias permite relacionar as características físicas do território às alterações provocadas pelo uso do solo e às estratégias de planejamento e gestão dos recursos hídricos (TEODORO et al., 2007; TUCCI, 2012).

Nas últimas décadas, o crescimento urbano tem transformado as condições naturais das bacias hidrográficas, especialmente em regiões metropolitanas. A substituição da vegetação e dos solos naturais por edificações, pavimentos e vias aumenta a impermeabilização da superfície e reduz a parcela da precipitação que infiltra no solo. Como consequência, ocorre maior geração de escoamento superficial, podendo aumentar a velocidade de resposta da bacia e a ocorrência de alagamentos, erosão e transporte de poluentes (OLIVEIRA; SILVA; TAVARES, 2020; TUCCI, 2012).

Esse processo torna-se ainda mais relevante diante das mudanças climáticas, que podem alterar os padrões de temperatura e precipitação, modificando a frequência e a intensidade dos eventos hidrológicos. Dessa forma, áreas urbanizadas tornam-se mais vulneráveis quando os sistemas de drenagem não acompanham as transformações do território (IPCC, 2021; CANHOLI, 2014). A interação entre urbanização e variabilidade climática deve, portanto, ser considerada na avaliação do comportamento hidrológico, sobretudo em bacias estratégicas para o abastecimento.

A Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP) está inserida na Região Metropolitana de Natal e abrange os municípios de Natal, Parnamirim e Macaíba. O rio Pitimbu apresenta relevância ambiental e socioeconômica por contribuir para o abastecimento hídrico regional, enquanto o Sistema Aquífero Barreiras constitui importante componente subterrâneo do sistema hídrico local (RIGHETTO; DIAS, 2016; OLIVEIRA; SILVA; TAVARES, 2020). Essa importância reforça a necessidade de compreender os efeitos das transformações territoriais sobre a dinâmica hidrológica da bacia.

Estudos apontam que a expansão urbana na área do Pitimbu está associada a mudanças no uso e ocupação do solo, exercendo pressão sobre áreas naturais e recursos hídricos (DUARTE et al., 2004; OLIVEIRA; SILVA; TAVARES, 2020). Nesse contexto, o escoamento superficial corresponde à parcela da precipitação que não infiltra ou não é armazenada e se desloca pela superfície em direção à rede de drenagem. Sua magnitude depende de fatores como solo, cobertura vegetal, relevo, intensidade e duração da chuva e grau de impermeabilização (TUCCI, 2012). Na BHRP, a redução da infiltração pode afetar também a recarga do Sistema Aquífero Barreiras, comprometendo a disponibilidade hídrica em períodos de menor precipitação (RIGHETTO; DIAS, 2016).

Assim, a análise integrada de séries pluviométricas, expansão urbana e dinâmica da superfície de água permite compreender possíveis alterações no balanço hídrico da bacia. Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo caracterizar o regime pluviométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu/RN, buscando relacioná-lo à urbanização e aos possíveis impactos na geração de escoamento superficial, considerando a sazonalidade das precipitações, a expansão das áreas urbanizadas e a dinâmica temporal da superfície de água entre 1985 e 2025.

Metodologia

2.1 Área de Estudo

A pesquisa foi desenvolvida na Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP), inserida na região do litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte e integrante da Região Metropolitana de Natal (RMN). A BHRP abrange uma superfície territorial de aproximadamente 131,67 km², delimitada entre as coordenadas geográficas 5°50’00’’ S a 5°57’53’’ S de latitude e 35°11’08’’ W a 35°23’19’’ W de longitude.

A bacia compreende porções dos municípios de Macaíba (onde se encontra a nascente do rio principal), Parnamirim e Natal, estendendo-se até a foz no Rio Taborda/Pirangi, a jusante da Lagoa do Jiqui — um dos mais importantes mananciais de água superficial da região. Territorialmente, a bacia apresenta um percentual de ocupação distribuído em aproximadamente 47% no município de Parnamirim, 43% em Macaíba e 10% na capital, Natal.

O Rio Pitimbu possui um curso principal de cerca de 33 a 36 km de extensão. Trata-se de um corpo d'água estratégico para o abastecimento público regional, responsável por suprir cerca de 30% da demanda de água potável da população local, além de atender ao setor industrial e a atividades agrícolas em menor escala.

Geologicamente, a bacia repousa sobre rochas cristalinas pré-cambrianas e sedimentares do Cretáceo, sobrepostas pela Formação Barreiras, depósitos eólicos (dunas) e coberturas aluvionares ao longo dos cursos d'água. O Sistema Aquífero Barreiras (SAB) atua predominantemente como um aquífero livre de elevada importância hidrogeológica, apresentando espessuras saturadas médias em torno de 30 a 40 metros. A região do baixo Pitimbu e o entorno da Lagoa do Jiqui configuram-se como zonas fundamentais de recarga aquífera e de intensa interação hidráulica entre as águas superficiais e subterrâneas. O clima local e as pressões antrópicas imprimem dinâmicas sazonais ao fluxo do rio, que apresenta trechos de intermitência ao longo do período seco e perenidade mantida principalmente pela recarga urbana e pelo descarte do efluente do aquífero.

Nas últimas décadas, a BHRP passou a ser classificada como uma bacia periurbana em

acelerado processo de transformação. O crescimento populacional desordenado nos municípios limítrofes, a alta densidade de tráfego promovida pela interseção de rodovias federais (BR-101 e BR-304) e os múltiplos usos do solo têm potencializado conflitos ambientais, contaminação de poços por nitrato e a degradação da qualidade da água. Esse cenário reforça a relevância da bacia como campo de estudo para a gestão integrada dos recursos hídricos.
Fonte: SERHID (20025).

2.2 Aquisição dos dados

Inicialmente, foi realizado um inventário das estações pluviométricas localizadas na bacia e em seu entorno imediato. Foram identificadas 31 estações cadastradas em bases oficiais. Os dados foram obtidos a partir do Portal da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (http://www.emparn.rn.gov.br/) e do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (https://www.gov.br/ana/pt-br). As séries foram examinadas considerando a continuidade dos registros, a extensão temporal e a disponibilidade de dados até agosto de 2025. Estações com falhas prolongadas, períodos muito curtos de registro ou inatividade foram excluídas. Ao final, foram selecionadas seis estações: UFRN-INMET-EMPARN, São José de Mipibu, PIRIPIRI-ANA, Macaíba-INMET, EMATER-Monte Alegre e Base Física da EMPARN.

Os dados das seis estações selecionadas foram utilizados para caracterizar o comportamento mensal das precipitações e identificar a sazonalidade regional. A distribuição espacial dos postos utilizados é apresentada na Figura 2.

Para a avaliação da transformação territorial, foram utilizados os dados do MapBiomas (2026) referentes ao crescimento da área urbanizada de Natal, Parnamirim e Macaíba entre 1985 e 2025. A interpretação foi realizada de forma comparativa, considerando a expansão das manchas urbanizadas ao longo do período e suas implicações hidrológicas, especialmente em relação à impermeabilização do solo.

Também foi analisada a série temporal mensal da superfície de água proveniente do MapBiomas nos três municípios da bacia, entre 1985 e 2025. Os dados foram utilizados para observar a variabilidade da área coberta por água ao longo do período. Vale salientar que os dados relativos às áreas impermeáveis e superfície de água, obtidos no MapBiomas, são referentes ao município como um todo e não somente a parcela drenada pelo Rio Pitimbu.

Resultados e Discussões

A triagem das estações pluviométricas revelou uma limitação importante para o monitoramento hidroclimático da BHRP. Das 31 estações identificadas na bacia e em seu entorno, somente seis apresentaram séries com continuidade e disponibilidade consideradas adequadas até agosto de 2025. A perda de postos e a descontinuidade das séries reduzem a capacidade de caracterizar espacialmente a precipitação e dificultam o desenvolvimento de análises hidrológicas mais robustas, aspecto relevante para o planejamento da drenagem urbana e da gestão de riscos (TUCCI, 2012; CUNHA, 2025). A distribuição das estações selecionadas é apresentada na Figura 2.

Os dados das seis estações evidenciaram um regime pluviométrico sazonal, com concentração das precipitações entre março e julho e redução dos volumes entre

setembro e janeiro (Figura 3). Essa sazonalidade é observada de forma consistente nas diferentes estações, embora os volumes variam espacialmente. Na estação UFRN-INMET-EMPARN , o maior valor médio mensal ocorreu em junho, superando 350 mm. Em São José de Mipibu e PIRIPIRI-ANA , os maiores acumulados concentram-se entre abril e junho. A Base Física da EMPARN apresenta máximo próximo de 290 mm, enquanto a EMATER-Monte Alegre apresenta máximo próximo de 200 mm. A estação Macaíba-INMET mantém o padrão regional.

A sazonalidade identificada possui implicações diretas sobre a dinâmica hidrológica da bacia. Durante o período chuvoso, os maiores volumes de precipitação aumentam a disponibilidade de água para infiltração e escoamento. Entretanto, quando a chuva incide sobre superfícies urbanizadas e impermeáveis, a parcela infiltrada tende a ser reduzida, favorecendo o escoamento superficial mais rápido. Em áreas com maior impermeabilização, esse processo pode antecipar a resposta da drenagem e elevar os picos de vazão durante eventos de chuva intensa (TUCCI, 2012; CANHOLI, 2014).

Nos períodos secos, a menor ocorrência de chuva reduz a entrada de água no sistema. Nesse cenário, a recarga subterrânea assume importância para a manutenção do armazenamento e do fluxo de base. Righetto e Dias (2016) destacam a relevância do Sistema Aquífero Barreiras para o balanço hídrico da BHRP. Dessa forma, a redução da infiltração associada à impermeabilização pode representar um efeito de longo prazo sobre a disponibilidade de água subterrânea, especialmente quando combinada a períodos de menor precipitação.

A bacia também apresenta uma elevada variabilidade interanual das precipitações, tomando a estação pluviométrica da Base Física da EMPARN como exemplo (Figura 4) observa-se que ao longo desse período de 24 anos, observa-se a alternância entre ciclos significativamente chuvosos — com destaques para os picos de precipitação observados em 2008 (superando 2.100mm) e em 2004 e 2009 (ambos ultrapassando os 2.000mm) — e períodos de estiagem severa. O ponto crítico de escassez pluviométrica ocorreu no ano de 2021, quando o acumulado anual ficou ligeiramente acima de 500mm, representando o menor volume registrado em toda a série temporal. Essa forte oscilação nos volumes acumulados anuais reflete a irregularidade do clima regional, o que interfere diretamente nos processos de escoamento superficial e no volume disponível para a recarga do Sistema Aquífero Barreiras.

Com relação a expansão das áreas urbanizadas de Natal, Parnamirim e Macaíba entre 1985 e 2025 (Figura 5), observa-se que houve um forte crescimento urbano em Parnamirim e Macaíba. O município de Natal apresenta um crescimento urbano menos acentuado, indicando que os municípios da região metropolitana têm crescido de forma mais acentuada que a capital.

É importante frisar que a transformação da cobertura natural em edificações, vias e outras superfícies impermeáveis representa uma alteração importante nas condições de geração do escoamento. Duarte et al. (2004) já identificavam transformações no uso e ocupação do solo da bacia, enquanto Oliveira, Silva e Tavares (2020) associam a expansão urbana a pressões sobre os recursos hídricos.

A interpretação conjunta das Figuras 3, 4 e 5 permite observar uma condição potencialmente desfavorável: o período de maiores precipitações ocorre em uma bacia que, ao longo do tempo, passou por crescente urbanização. A impermeabilização reduz a capacidade de armazenamento temporário e infiltração do solo e pode aumentar a velocidade de transferência da água para a rede de drenagem. Em consequência, chuvas concentradas podem produzir respostas mais rápidas e maiores volumes de escoamento superficial em setores urbanizados (TUCCI, 2012; CANHOLI, 2014).

Esse processo também possui implicações para a qualidade da água. O aumento do

escoamento superficial urbano pode transportar sedimentos, resíduos e poluentes acumulados nas superfícies para os sistemas de drenagem e, posteriormente, para os corpos hídricos. Esse mecanismo de transporte difuso é especialmente relevante em áreas com ocupação intensa e contribui para a pressão sobre a qualidade dos recursos hídricos (CANHOLI, 2014; OLIVEIRA; SILVA; TAVARES, 2020).

A Figura 6 ilustra a evolução da superfície anual média de água na Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu entre 1985 e 2025, evidenciando uma acentuada oscilação e uma tendência de redução ao longo das décadas. No período inicial, a área alagada manteve-se em patamares elevados, alcançando o seu ponto máximo em 2005, com 378,64 ha. A partir de 2010, observa-se uma trajetória de retração contínua e acentuada que culminou no menor registro da série histórica em 2017 (216,37 ha), marcando um período crítico de escassez hídrica na bacia. Nos anos subsequentes (2018 a 2023), a extensão do espelho d'água permaneceu estagnada em níveis baixos (em torno de 220 a 235 ha), ensaiando uma leve recuperação apenas na reta final da série (2024–2025), quando ultrapassou novamente os 250 ha. Vale destacar a lacuna temporal entre 1995 e 1996, decorrente da ausência de dados para o período.

A redução da superfície de água não deve ser atribuída exclusivamente à urbanização, pois a própria série apresenta variabilidade temporal e a disponibilidade hídrica também responde às condições climáticas. A interpretação é coerente com a discussão de Righetto e Dias (2016) sobre a importância do Sistema Aquífero Barreiras para o balanço hídrico da bacia.

As projeções e discussões apresentadas pelo IPCC (2021) indicam que alterações no regime de precipitação e o aumento de extremos hidrológicos podem ampliar os desafios de gestão da água. Em uma bacia que apresenta crescimento urbano, a combinação de chuvas intensas com superfícies impermeáveis pode aumentar os riscos de alagamentos e erosão, enquanto períodos de menor precipitação podem ampliar a pressão sobre a recarga e a disponibilidade hídrica.

Os resultados, portanto, apontam para a necessidade de uma estratégia de gestão que não se limite à rápida condução da água da chuva. Técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development – LID), como pavimentos permeáveis, poços e trincheiras de infiltração, jardins de chuva e bacias de retenção ou detenção, podem contribuir para armazenar temporariamente a água, reduzir picos de escoamento e favorecer a infiltração, quando tecnicamente adequadas às condições locais (CANHOLI, 2014). A proteção das APPs e das zonas de recarga também é fundamental para preservar os processos naturais de armazenamento e transferência da água.

Outro resultado relevante é a necessidade de ampliar a rede de monitoramento. A existência de apenas seis estações com séries históricas consideradas adequadas entre 31 estações identificadas mostra uma lacuna que pode comprometer a avaliação de eventos extremos e a calibração de modelos. A reativação de estações inativas e a implantação de postos automáticos pluviométricos e fluviométricos podem melhorar a base de dados necessária ao planejamento urbano e à gestão de riscos.

Conclusão

A análise integrada da Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu permitiu identificar uma combinação de fatores que interferem na dinâmica hidrológica regional. Os dados pluviométricos das seis estações selecionadas demonstraram forte sazonalidade, com concentração das chuvas entre março e julho e redução dos volumes entre setembro e janeiro. Essa característica, quando associada ao crescimento das áreas urbanizadas, aumenta a importância de compreender como a impermeabilização modifica a resposta da bacia às precipitações.

Os resultados evidenciam a expansão das áreas urbanizadas de Natal, Parnamirim e Macaíba nas últimas décadas. Esse processo pode aumentar os riscos de alagamentos, erosão e transporte de poluentes.

A série de superfície de água registrou uma redução líquida de 3,5% entre o primeiro e o último registro. Embora esse indicador não permita, isoladamente, estabelecer causalidade, sua interpretação conjunta com a expansão urbana e a variabilidade pluviométrica reforça a vulnerabilidade do sistema hídrico e a necessidade de aprofundar o monitoramento dos processos de infiltração, recarga subterrânea e armazenamento.

Considerando os resultados obtidos, recomenda-se que a gestão da BHRP seja orientada por três frentes complementares: (i) adoção de soluções baseadas na natureza e técnicas LID para reduzir e retardar o escoamento na fonte; (ii) proteção e recuperação das APPs e das zonas de recarga do Sistema Aquífero Barreiras, evitando a expansão da impermeabilização sobre áreas ambientalmente estratégicas; e (iii) modernização e ampliação da rede de monitoramento pluviométrico e fluviométrico, reduzindo as lacunas identificadas nas séries históricas.

Assim, o estudo reforça que a segurança hídrica da Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu depende da integração entre planejamento urbano, conservação ambiental, drenagem sustentável e monitoramento hidroclimático. Como continuidade da pesquisa, recomenda-se a realização de análises estatísticas de tendência e correlação, a quantificação da evolução das áreas impermeáveis e a aplicação de modelos hidrológicos calibrados, de modo a testar quantitativamente os efeitos da urbanização e de diferentes cenários climáticos sobre o escoamento superficial.

Referências

CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CUNHA, S. P. F. Diagnóstico ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu: uma revisão bibliográfica. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2025.

DUARTE, C. R.; PETTA, R. A.; MEDEIROS, C. N.; ARAÚJO, L. P. Mapeamento do uso e ocupação do solo da Bacia do Rio Pitimbu (RN). In: SIMPÓSIO REGIONAL DE

GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 2., 2004, Aracaju. Anais [...]. Aracaju: SRGSR, 2004.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

MAPBIOMAS ÁGUA. Mapeamento da Superfície de Água no Brasil. Disponível em: <https://bacias.mapbiomas.org/>. Acesso em: 1 ago. 2026.

OLIVEIRA, C. S. P.; SILVA, J. C.; TAVARES, J. L. Análise de qualidade da água e percepção ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP). Revista Brasileira de Meio Ambiente, v. 8, n. 3, p. 13-26, 2020.

RIGHETTO, A. M.; DIAS, D. F. Balanço hídrico do Sistema Aquífero Barreiras na Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu-RN. Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 394-410, 2016.

SERHID – Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos, Diagnóstico Referencial da Bacia do Rio Pitimbu. Natal, 2005

SILVA, F. M. da; MEDEIROS, R. M. T. de. Análise da fragilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu - RN. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 13, n. 4, p. 1820-1835, 2020.

SOUSA, T. P. B. Revisão do estado atual da Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (RN) e suas características ambientais. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

TEODORO, V. L. I. et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. Revista Uniara, Araraquara, n. 20, p. 137-156, 2007.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2012.

Anexos



Figura 1. Localização da área de estudo. Fonte: SERHID (20025).



Figura 2. Localização das estações pluviométricas utilizadas na pesquisa da Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu. Fonte: Autoria própria.



Figura 3. Precipitação média mensal na 06 estação pluviométrica estudadas: (a) UFRN-INMET-EMPARN (b) São José de Mipibu, (c) Piripiri-ANA, (d) Base Física da EMPARN, (e) EMATER-Monte Alegre, (f) Macaíba-INMET. Fonte: Autoria própria.



Figura 4. Precipitação total anual na estação pluviométrica Base Física da EMPARN Fonte: Autoria própria. Fonte: Autoria própria.



Figura 5. Crescimento da área urbanizada nos municípios de Natal, Parnamirim e Macaíba, entre 1985 e 2025. Fonte: Autoria própria.



Figura 6. Série temporal anual da superfície de água na Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu, de 1985 a 2025. Fonte: Autoria própria.

CÓDIGO: ET0781

AUTOR: ALBA THALITA BARBOZA DE ARAUJO

ORIENTADOR: FABIO MENEGHETTI UGULINO DE ARAUJO

TÍTULO: Manufatura Aditiva e Indústria 4.0: Fundamentos, Tecnologias e Aplicações Transformadoras

Resumo

A Manufatura Aditiva (MA) consolida-se como um dos pilares fundamentais da Indústria 4.0. Desde o surgimento da estereolitografia, na década de 1980, a tecnologia evoluiu da prototipagem rápida para a produção direta de componentes finais de alta complexidade geométrica. Esse ecossistema fundamenta-se em um fluxo de trabalho digital integrado, que compreende a modelagem CAD, o fatiamento e a impressão 3D, sendo suportado tanto por softwares gratuitos (como UltiMaker Cura e CHITUBOX Basic) quanto por soluções pagas (a exemplo do Autodesk Fusion 360 e CHITUBOX Pro). Embora a MA abranja diversos processos, incluindo a fusão em leito de pó (SLS, DMLS e EBM) para polímeros de alta performance e ligas metálicas de aço, titânio e alumínio, o presente estudo concentra suas análises no aprofundamento prático e experimental das tecnologias de Modelagem por Deposição Fundida (FDM/FFF) e de Fotopolimerização em Tina (SLA/MSLA).

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Indústria 4.0; FDM/FFF; SLA/MSLA.

TITLE: Additive Manufacturing and Industry 4.0: Fundamentals, Technologies and Transformative Applications

Abstract

Additive Manufacturing (AM) has established itself as one of the fundamental pillars of Industry 4.0. Since the emergence of stereolithography in the 1980s, the technology has evolved from rapid prototyping to the direct production of final components with highly complex geometries. This ecosystem is based on an integrated digital workflow that includes CAD modeling, slicing, and 3D printing, supported by both free software (such as UltiMaker Cura and CHITUBOX Basic) and paid solutions (such as Autodesk Fusion 360 and CHITUBOX Pro). Although AM encompasses various processes, including powder bed fusion (SLS, DMLS, and EBM) for high-performance polymers and metal alloys such as steel, titanium, and aluminum, this study focuses its analysis on a practical and experimental exploration of Fused Deposition Modeling (FDM/FFF) and Tank-Based Photopolymerization (SLA/MSLA) technologies.

Keywords: Additive Manufacturing; Industry 4.0; FDM/FFF; SLA/MSLA.

Introdução

A manufatura aditiva (MA), também chamada de impressão 3D, se estabeleceu como um dos pilares estratégicos e transformadores da Quarta Revolução Industrial, a Indústria 4.0. Diferente dos métodos de fabricação tradicionais, que dependem do corte e remoção de material (manufatura subtrativa) ou da conformação por moldes e matrizes, a manufatura aditiva utiliza a sobreposição contínua de camadas de matéria-prima a partir de um modelo digital tridimensional. Essa metodologia inovadora redefiniu os padrões de produção, permitindo a fabricação de geometrias de alta complexidade, a otimização topológica de componentes e a personalização em massa com redução significativa de desperdício de insumos.
A trajetória da manufatura aditiva começou na década de 1980, marcada pela invenção da Estereolitografia (SLA) por Charles Hull. Ao longo dos últimos quarenta anos, a tecnologia sofreu mudanças significativas, tendo começado com uma ferramenta restrita à prototipagem rápida e ao desenvolvimento conceitual de produtos no setor industrial. O setor foi transformado pelo crescimento exponencial do processamento computacional, pela expiração de patentes históricas no início dos anos 2000, que impulsionou o movimento de código aberto (open-source), e pela diversificação de materiais. A manufatura aditiva deixou de ser apenas uma ferramenta de validação estética e funcional para se posicionar como um método produtivo direto de peças finais e funcionais, integrado a ambientes industriais avançados.
Atualmente, o universo da manufatura aditiva engloba diversas tecnologias, classificadas de acordo com o processo de consolidação do material. Entre os processos mais difundidos, destaca-se a Modelagem por Deposição Fundida (FDM/FFF), que se baseia na extrusão de filamentos termoplásticos aquecidos e se destaca pelo baixo custo e acessibilidade. Para demandas que exigem maior resolução, a Estereolitografia (SLA) e o Processamento Digital de Luz (DLP) utilizam a fotopolimerização de resinas líquidas para entregar acabamentos superficiais superiores. No contexto industrial avançado, a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) permite a consolidação de polímeros em pó sem necessidade de suportes, enquanto a Fusão Seletiva a Laser (DMLS/SLM) e a Fusão por Feixe de Elétrons (EBM) utilizam leitos de pó metálico para processar ligas de titânio, alumínio e aço, viabilizando a aplicação direta de componentes nos setores aeroespacial, biomédico e automotivo.

Metodologia

Este projeto combina a prática experimental direta com estudo teórico para cobrir o amplo espectro da manufatura aditiva. Enquanto os processos de fusão em leito de pó, como a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), a Fusão Seletiva a Laser (DMLS/SLM) e a Fusão por Feixe de Elétrons (EBM), foram investigados do ponto de vista estritamente teórico, devido à sua complexidade operacional e alta demanda infraestrutural, a abordagem prática concentrou-se nos dois métodos de impressão 3D mais acessíveis e amplamente difundidos: a extrusão de termoplásticos e a fotopolimerização em tina.

O primeiro método prático analisado foi a Modelagem por Deposição Fundida (FDM/FFF), utilizando as impressoras Creality K1 Max e UltiMaker S7. Esta técnica baseia-se na extrusão mecânica de um filamento termoplástico (como PLA, ABS ou PETG) guiado por um cabeçote aquecido (hotend). O material é fundido e depositado seletivamente sobre uma plataforma de construção, camada por camada, solidificando-se rapidamente à medida que resfria. Na prática, o fluxo exigiu o domínio de variáveis operacionais cruciais no software fatiador, como a calibração de temperatura do bico e da mesa, a velocidade de extrusão, a altura da camada e a densidade do preenchimento interno (infill), além do controle de aderência e suporte para peças com balanços acentuados.

O segundo método prático abrangeu as tecnologias baseadas em Resina Fotossensível (SLA/DLP/LCD), com a utilização das impressoras Halot Mage S e Formlabs Form 4. Diferente da extrusão FDM, o processo por resina utiliza a fotopolimerização em tina: uma fonte de luz ultravioleta (seja por um feixe laser direcionado por espelhos galvanométricos no SLA, ou por uma tela LCD/projetor LED no DLP/LCD) cura seletivamente camadas de um polímero líquido fotossensível. Esse método destaca-se por entregar peças com isotropia mecânica elevada, altíssima definição de detalhes e excelente acabamento superficial. A prática com resina demandou cuidados específicos de segurança e procedimentos rigorosos de pós-processamento, incluindo a lavagem da peça em álcool isopropílico para remoção de resíduos líquidos e a pós-cura UV em câmara fechada para a completa reticulação do material.

Para viabilizar a execução prática nos equipamentos selecionados, foram utilizados materiais específicos para cada tecnologia de impressão. Nas impressoras FDM (Creality K1 Max e UltiMaker S7), empregaram-se filamentos termoplásticos com destaque para o PLA (Poliácido Lático), devido à sua alta facilidade de processamento, boa estabilidade dimensional e ausência de empenamento (warping), e o PETG (Polietileno Tereftalato Glicol), escolhido para peças que demandavam maior resistência mecânica, tenacidade e estabilidade química. Além desses insumos de bancada, a investigação teórica abrangeu a diversidade de filamentos disponíveis no mercado de FDM, incluindo o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e o ASA, valorizados pela resistência térmica e ao intemperismo; polímeros flexíveis como o TPU (Poliuretano Termoplástico); materiais de alta performance mecânica como o Nylon (PA) e o Polycarbonate (PC); além de compósitos reforçados com fibra de carbono ou de vidro, que conferem elevada rigidez estrutural às peças. Já para a tecnologia de fotopolimerização em tina, foram utilizadas resinas fotossensíveis específicas para cada equipamento: na impressora Creality Halot Mage S, empregou-se a resina Creality 3D Printer UV Curable Resin, voltada para cura rápida por matriz UV; enquanto na Formlabs Form 4, utilizou-se a resina de engenharia Formlabs Grey Resin V5. A aplicação desses insumos garantiu alta fidelidade dimensional, elevada precisão nos detalhes finos e excelente acabamento superficial, características essenciais para a análise da qualidade mecânica e estética das peças produzidas.

Na etapa de preparação digital para a fabricação, o processo de fatiamento (slicing) desempenhou o papel de ponte entre os modelos tridimensionais (CAD) e as instruções executáveis pelas máquinas (G-code). Para as impressoras de fusão por extrusão (FDM), utilizou-se o Creality Print na parametrização da Creality K1 Max, explorando perfis de alta velocidade e controle dinâmico de fluxo, e o UltiMaker Cura para a UltiMaker S7, permitindo o ajuste fino de parâmetros críticos como densidade e padrão de preenchimento (infill), altura de camada, orientação da peça, geração de estruturas de suporte e temperaturas de extrusão e mesa. Já para a tecnologia de resina, o fatiamento foi conduzido no CHITUBOX para a Halot Mage S, no qual foram configurados o

tempo de exposição por camada, altura de elevação, o esvaziamento (hollowing) para economia de resina e a inserção de orifícios de drenagem. Paralelamente, para a Formlabs Form 4, utilizou-se o ecossistema proprietário PreForm, que automatizou com alta precisão a orientação das peças, a densidade dos pontos de contato dos suportes e o cálculo do tempo de polimerização, otimizando o fluxo de trabalho e minimizando falhas de impressão.

Além dos fatiadores operados, a análise teórica mapeou diversos softwares disponíveis no mercado, diferenciando-se entre alternativas gratuitas e pagas. No método FDM, os softwares gratuitos que se destacam são UltiMaker Cura, PrusaSlicer e OrcaSlicer, amplamente adotados pela flexibilidade, enquanto as opções pagas e industriais, como o Simplify3D, Autodesk Fusion 360 e Netfabb, oferecem controle avançado de estruturas de suporte, otimização topológica e simulação térmica. Paralelamente, no segmento de resina, ferramentas gratuitas como CHITUBOX Basic, Halot Box e Formlabs PreForm suprem as necessidades essenciais de preparação, enquanto soluções pagas como CHITUBOX Pro e Lychee Slicer Pro disponibilizam algoritmos complexos de ahollow (perfuração), orientação automática e mitigação das forças de sucção na tina.

Resultados e Discussões

Para a tecnologia FDM/FFF, investigou-se a aplicação dos filamentos PLA e PETG produzidos por diferentes fabricantes consolidados no mercado, tais como Flashforge, Voolt3D, Masterprint, Elegoo e da Creality. No tocante ao PLA, o estudo contemplou a análise comparativa entre a sua formulação tradicional e as variações estéticas e superficiais disponíveis no mercado, como as versões Silk (brilho acetinado), Multicolor/Rainbow (gradiente de cores) e Velvet/Matte (acabamento fosco de textura aveludada). Adicionalmente, avaliou-se o aspecto visual e o acabamento de superfície resultantes da impressão de peças em PLA e PETG utilizando a mesma pigmentação de cor, identificando as distinções térmicas e ópticas características de cada polímero.

Com a aquisição e o processamento de filamentos provenientes de diversos fabricantes, constatou-se que determinados insumos, como por exemplo alguns filamentos da Voolt3D e Masterprint, demandam um processo prévio de secagem em estufa para atingir o desempenho ideal de impressão. Essa necessidade evidencia maior higroscopia nesses materiais, os quais tendem a absorver mais umidade do ambiente, resultando em defeitos como borbulhamento, fiapos (stringing) e perda de resistência mecânica caso não sejam desidratados antes do uso.

Adicionalmente, observou-se que as variações estéticas e superficiais do PLA exigem parametrizações específicas nos softwares fatiadores. Enquanto o PLA Multicolor/Rainbow não apresentou alterações significativas nos parâmetros térmicos e cinemáticos padrões, mantendo a janela de processamento idêntica à do PLA tradicional, as versões PLA Silk e Velvet/Matte demandaram ajustes de processo, como o aumento na temperatura do bico extrusor (hotend) e o controle adequado da velocidade de impressão, estratégias necessárias para favorecer a expansão do polímero e garantir a máxima vivacidade do brilho acetinado ou a uniformidade da textura fosca.

Em relação à comparação visual e ao acabamento superficial das peças impressas em PLA e PETG, utilizou-se filamentos de um mesmo fabricante para padronizar as amostras e eliminar quaisquer discrepâncias decorrentes da formulação química de

marcas distintas. Sob a perspectiva estética, não foram observadas diferenças visuais significativas entre os dois polímeros. Contudo, a análise mecânica destacou a superioridade do PETG no tocante à resistência física, à tenacidade e à capacidade de absorção de impactos quando comparado ao PLA tradicional.

Já para a tecnologia de fotopolimerização, investigou-se a aplicação das resinas Formlabs Grey Resin V5 e Creality 3D Printer UV Curable Resin, cujos resultados evidenciaram distinções fundamentais quanto ao grau de integração à estabilidade reológica da formulação e ao direcionamento técnico na manufatura aditiva.

No que tange à Formlabs Grey Resin V5, trata-se de um fotopolímero de grau de engenharia desenvolvido para ambientes fechados de alta fidelidade (como a plataforma Formlabs Form 4). Sua formulação de quinta geração (V5) apresenta cinética de polimerização otimizada e baixa viscosidade, reduzindo a tensão superficial e as forças de sucção durante o destacamento das camadas. Essa dinâmica assegura elevada isotropia mecânica e excelente estabilidade dimensional pós-cura, tornando-a ideal para prototipagem funcional de alta precisão e componentes de tolerância micrométrica.

Em contrapartida, a Creality 3D Printer UV Curable Resin é formulada para sistemas de mascaramento por matriz LCD (MSLA) operando no comprimento de onda de 405 nm (como a Creality Halot Mage S). O insumo conta com fotoiniciadores de alta reatividade que priorizam ciclos curtos de exposição por camada, entregando excelente nitidez geométrica, acabamento superficial suave e alta produtividade a um custo operacional reduzido, sendo indicada para validação estética, modelos conceituais e prototipagem geral.

Em análise comparativa, ambas as resinas entregaram acabamento e definição visual equivalentes. Contudo, a Formlabs Grey Resin V5 destacou-se por sua superioridade mecânica, apresentando maior tenacidade e resistência física frente às solicitações estruturais, enquanto a Creality 3D Printer UV Curable Resin distinguiu-se pelo excelente custo-benefício.

No ecossistema FDM operado no projeto, os softwares fatiadores desempenharam um papel estratégico na preparação e geração do código de comando (G-code) direcionado às impressoras. O aprofundamento nas funcionalidades da plataforma permitiu explorar melhor o potencial da cinemática CoreXY de alta velocidade, ajustando parâmetros técnicos críticos para equilibrar a eficiência do tempo de ciclo, a integridade estrutural e a fidelidade dimensional das peças fabricadas.

A parametrização do processo envolveu o gerenciamento térmico e de fluxo, com o ajuste fino das temperaturas de extrusão no hotend e da mesa aquecida para cada variação polimérica estudada, incluindo o PETG e as vertentes de PLA (Silk, Velvet, Multicolor e Tradicional). Esse controle permitiu alinhar a taxa de vazão (flow rate) às elevadas velocidades de trabalho do equipamento, prevenindo falhas por subextrusão. Adicionalmente, refinou-se a dinâmica de resfriamento e deposição de camadas, regulando a aceleração, a ventilação da câmara e os tempos mínimos de camada para assegurar a sólida união interlayer e a correta solidificação em pontes e superfícies superiores (top layers).

Por fim, a otimização abrangeu a seleção estratégica das geometrias internas e dos elementos de ancoragem. Definiu-se a escolha e a densidade dos padrões de preenchimento (infill), como o giroidal, visando maximizar a resistência mecânica multidirecional com o menor consumo de insumo. Paralelamente, configuraram-se estruturas de suporte do tipo Tree (árvore) e em grade com folgas de interface personalizadas, o que facilitou a remoção manual no pós-processamento e minimizou as marcas de contato nas áreas em balanço.

Conclusão

A execução deste plano de trabalho permitiu a consolidação de uma formação técnico-científica sólida sobre os pilares, processos e materiais da Manufatura Aditiva (MA) no contexto da Indústria 4.0. Ao integrar a fundamentação teórica de âmbito geral com a prática experimental em laboratório, foram obtidos resultados relevantes em cada uma das fases do ciclo de fabricação digital, abrangendo a caracterização de tecnologias, a parametrização do fluxo de software, a seleção de insumos e a produção de material para difusão científica e educacional.
Também o estudo dessas plataformas demonstrou que a escolha adequada do fatiador influencia diretamente a economia de insumos, o tempo de fabricação e a qualidade final dos componentes.

Referências

3D SYSTEMS. SLA and SLS Printer Technology Overview. Rock Hill: 3D Systems, 2024. Disponível em: https://www.3dsystems.com. Acesso em: 15 mai. 2026.

AUTODESK. Fusion 360 – Official Documentation. San Rafael: Autodesk, 2024. Disponível em: https://www.autodesk.com. Acesso em: 20 jul. 2026.

BOURELL, D. et al. A Brief History of Additive Manufacturing. Austin: University of Texas at Austin, 2009.

EOS. Additive Manufacturing vs. 3D Printing – Terminology and History. Krailling: EOS, 2022. Disponível em: https://www.eos.info. Acesso em: 12 dez. 2025.

FORMLABS. Resin Materials and Applications Guide. Somerville: Formlabs, 2023. Disponível em: https://formlabs.com/materials/. Acesso em: 02 jun. 2026.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies. 3. ed. Cham: Springer, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7.

KRUTH, J. P. et al. Progress in Additive Manufacturing. CIRP Annals, v. 47, n. 2, p. 525–540, 1998.

LIMA, T. R.; GOULART, A. L. Manufatura Aditiva no ensino técnico. Revista de Gestão e Projetos, v. 13, n. 1, 2022.

MIT. Additive Manufacturing. Cambridge: edX, 2022. Disponível em: https://www.edx.org/course/additive-manufacturing. Acesso em: 10 mar. 2026.

PRUSA RESEARCH. PrusaSlicer Documentation. Praga: Prusa Research, 2024. Disponível em: https://help.prusa3d.com. Acesso em: 15 jun. 2026.

RILKO, J. C. Manufatura aditiva aplicada ao ensino de engenharia. Rio Verde: Universidade de Rio Verde (UNIRV), 2021.

SANTOS, V. G.; OLIVEIRA, T. P. Indústria 4.0 e manufatura aditiva. São Paulo: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), 2020.

SENAI. Curso Introdução à Manufatura Aditiva. Brasília: SENAI, 2023. Disponível em: https://loja.mundosenai.com.br. Acesso em: 20 fev. 2026.

STRATASYS. Applications of FDM and PolyJet in Industry. Eden Prairie: Stratasys, 2023. Disponível em: https://www.stratasys.com. Acesso em: 10 fev. 2026.

ULTIMAKER. Cura Slicer Software. Utrecht: Ultimaker, 2024. Disponível em: https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura. Acesso em: 18 jul. 2026.

VOLPATO, N. Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2020.

VOLPATO, N. Tecnologias e Aplicações da Manufatura Aditiva. São Paulo: Blucher, 2022.

CÓDIGO: ET0804

AUTOR: ALANA PRISCILA DANTAS SOARES

ORIENTADOR: LINDEMBERG DE JESUS NOGUEIRA DUARTE

TÍTULO: Análise da produção de hidrogênio eletrolítico utilizando como fonte de energia um sistema híbrido baseado em energia solar, eólica e química

Resumo

A pesquisa investiga a produção de hidrogênio verde por eletrólise da água utilizando um sistema híbrido de geração solar-eólica com armazenamento em baterias. O estudo combina experimentos eletroquímicos, análise energética e modelagem computacional no DWSIM. Foram avaliados diferentes materiais de eletrodos, concentrações de NaOH, tensões de operação e duas configurações de eletrolisadores. Os resultados indicaram que o eletrodo de tela Flynet de níquel com revestimento catalítico apresentou o melhor desempenho, enquanto o Eletrolisador 1 apresentou maior eficiência energética e menor consumo específico, especialmente em 2 V. O sistema híbrido produziu 18,58 kWh e possibilitou a produção experimental de 0,288 kg de H_2, com eficiência global próxima de 49–50%. A modelagem no DWSIM apresentou concordância com os resultados experimentais, indicando a viabilidade técnica da integração entre fontes renováveis e produção de hidrogênio.

Palavras-chave: hidrogênio verde, eletrólise, sistema híbrido, eficiência energética.

TITLE: Analysis of electrolytic hydrogen production using a hybrid energy system based on solar, wind, and chemical energy.

Abstract

The research investigates green hydrogen production via water electrolysis using a hybrid solar-wind generation system with battery storage. The study combines electrochemical experiments, energy analysis, and computational modeling in DWSIM. Various electrode materials, NaOH concentrations, operating voltages, and two electrolyzer configurations were evaluated. The results indicated that the nickel Flynet mesh electrode with a catalytic coating exhibited the best performance, while Electrolyzer 1 showed higher energy efficiency and lower specific consumption, particularly at 2 V. The hybrid system generated 18.58 kWh and enabled the experimental production of 0.288 kg of H_2, with an overall efficiency of approximately 49–50%. The DWSIM modeling aligned with the experimental results, demonstrating the technical feasibility of integrating renewable sources with hydrogen production.

Keywords: green hydrogen, electrolysis, hybrid system, energy efficiency, DWSIM.

Introdução

A introdução parte do problema da transição energética e da necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa associadas ao uso de combustíveis fósseis. Nesse contexto, fontes renováveis como solar e eólica são apresentadas como alternativas importantes, especialmente no Brasil, que possui elevada participação de fontes renováveis em sua matriz energética.

Entretanto, solar e eólica apresentam uma característica fundamental: intermitência. A produção de energia varia conforme a disponibilidade de radiação solar e vento. Por isso, o trabalho propõe a utilização de um sistema híbrido solar-eólico associado a armazenamento em bateria, buscando maior estabilidade no fornecimento de energia.

Nesse cenário, o hidrogênio verde aparece como um vetor energético capaz de armazenar a energia proveniente das fontes renováveis. A eletrólise da água permite utilizar eletricidade para produzir hidrogênio, mas apresenta desafios relacionados principalmente ao consumo de energia, eficiência dos eletrolisadores, materiais dos eletrodos e perdas eletroquímicas.

Assim, a pesquisa busca responder essencialmente:

Como produzir hidrogênio por eletrólise utilizando energia renovável de forma energeticamente eficiente?

Para isso, são investigados materiais de eletrodos, condições operacionais, configurações de eletrolisadores, desempenho do sistema híbrido e uma representação computacional do processo no DWSIM.

O objetivo geral é investigar a eficiência da produção de hidrogênio por eletrólise, avaliando diferentes eletrodos e condições operacionais e utilizando o DWSIM para modelar o sistema.

Metodologia

Foi utilizado um sistema híbrido solar-eólico, integrado a um banco de baterias. A bateria possui capacidade nominal de 4,8 kWh e funciona como elemento de armazenamento, absorvendo excedentes de geração e fornecendo energia nos períodos de menor geração renovável.

Foram construídos e avaliados dois eletrolisadores:

Eletrolisador 1: utilizado principalmente para selecionar o melhor par de eletrodos;

Eletrolisador 2: utilizado para investigar a influência da geometria, configuração e presença de membrana.

Ambos foram operados à temperatura ambiente e pressão atmosférica, utilizando NaOH como eletrólito alcalino. O Eletrolisador 1 possui volume útil aproximado de 600 mL e distância entre eletrodos de 2,3 cm; o Eletrolisador 2 possui aproximadamente 200 mL e distância entre eletrodos de 1,5 cm.

Foram investigados:

tensão aplicada;

corrente elétrica;

densidade de corrente;

concentração de NaOH;

material dos eletrodos;

produção de H_2;

consumo específico de energia;

eficiência energética do eletrolisador;

eficiência faradaica;

influência da membrana;

disponibilidade de energia solar e eólica.

As tensões estudadas ficaram entre 2 e 6 V.

Após os experimentos, o processo foi representado no DWSIM, utilizando a disponibilidade de energia renovável como referência para avaliar os balanços de massa e energia e o potencial de produção de hidrogênio.

Também foram realizados retestes em triplicata e análise estatística para verificar a dispersão e a repetibilidade dos resultados.

Resultados e Discussões

Efeito do eletrodo. Entre os materiais avaliados, o eletrodo de tela Flynet de níquel com revestimento catalítico apresentou o melhor desempenho eletroquímico e energético. Isso mostra que a escolha do material do eletrodo é fundamental para o desempenho do eletrolisador.

Efeito da tensão, um dos resultados centrais é que aumentar a tensão aumenta a produção de hidrogênio, mas não significa necessariamente maior eficiência.

Com o aumento da tensão:

tensão ↑ → corrente ↑ → produção de H_2 ↑

mas também:

tensão ↑ → perdas ôhmicas + sobrepotenciais ↑ → consumo energético ↑ → eficiência ↓

Esse comportamento é explicitamente discutido no trabalho.

O Eletrolisador 1 apresentou seu melhor desempenho energético em 2 V, alcançando aproximadamente:

50,09% de eficiência energética;

66,54 kWh/kgH_2 de consumo específico;

aproximadamente 80% de eficiência faradaica.

Em 6 V, o consumo específico ultrapassou 170 kWh/kgH_2 e a eficiência caiu para valores inferiores a 20%.

Portanto, a maior produção instantânea não representa necessariamente o melhor ponto de operação.

Em baixa tensão, especialmente em 2 V, o Eletrolisador 1 apresentou maior eficiência energética e faradaica.

Em tensões mais elevadas, o Eletrolisador 2 apresentou maior densidade de corrente e maior produção instantânea de H_2, porém com maior demanda energética por unidade de hidrogênio produzido.

Assim, o trabalho conclui que o Eletrolisador 1 apresentou o melhor desempenho global, principalmente considerando eficiência e consumo energético.

A membrana Nafion NR 211, utilizada no Eletrolisador 2, apresentou efeito positivo principalmente em baixa tensão.

Segundo os resultados apresentados, sua utilização:

reduziu o consumo energético;

aumentou a eficiência energética em aproximadamente 18%;

aumentou a eficiência faradaica em aproximadamente 29% na menor tensão.

A membrana também favoreceu a separação dos gases e reduziu perdas associadas ao crossover e à recombinação dos produtos.

Um ponto conceitualmente muito importante da discussão é:

O ponto ótimo não é necessariamente aquele que produz mais hidrogênio por unidade de tempo.

O trabalho mostra que existe um compromisso entre:

produção de H_2 × consumo energético × eficiência × estabilidade.

Por isso, operar com tensão elevada pode aumentar a taxa de produção, mas também aumenta significativamente o consumo de energia. A dissertação considera mais favorável uma condição de menor tensão e densidade de corrente moderada. 3.6 Sistema solar-eólico

O sistema híbrido foi capaz de fornecer energia suficiente para o processo de eletrólise. O banco de baterias desempenhou papel importante ao armazenar excedentes e fornecer energia durante períodos de menor disponibilidade solar/eólica.

No conjunto experimental, o sistema produziu:

18,58 kWh de energia → 0,288 kg de H_2

considerando o poder calorífico inferior do hidrogênio de 33,3 kWh/kg, resultando em eficiência global próxima de 49–50%.

A simulação computacional apresentou concordância com os resultados experimentais, validando os balanços de massa e energia utilizados no estudo.

Isso é importante porque permite utilizar a modelagem para estudar cenários de produção de hidrogênio sem precisar realizar todos os testes experimentalmente.

Os experimentos foram realizados em triplicata.

A análise estatística indicou boa repetibilidade, principalmente nas tensões intermediárias de 4 e 5 V, que apresentaram menor dispersão dos principais indicadores. Em 6 V houve maior variabilidade, enquanto 2 V apresentou maior influência relativa dos erros associados à baixa densidade de corrente.

Conclusão

A dissertação conclui que a integração de energia solar + energia eólica + armazenamento em bateria + eletrólise é tecnicamente e energeticamente viável para produção de hidrogênio verde.

O melhor desempenho experimental foi associado ao Eletrolisador 1 utilizando eletrodo de tela Flynet de níquel com revestimento, especialmente em 2 V, com aproximadamente 50% de eficiência energética, 66,54 kWh/kgH_2 de consumo específico e aproximadamente 80% de eficiência faradaica.

A utilização da membrana no Eletrolisador 2 também apresentou vantagens, particularmente em baixa tensão, aumentando as eficiências energética e faradaica e reduzindo o consumo específico.

Por fim, o DWSIM reproduziu de forma coerente os balanços de massa e energia, enquanto a análise estatística confirmou a repetibilidade dos experimentos. Em uma frase: qual é a essência da dissertação?

A pesquisa demonstra experimentalmente e por simulação que é possível utilizar a complementaridade entre energia solar e eólica, apoiada por baterias, para alimentar a eletrólise da água e produzir hidrogênio verde, sendo a eficiência do processo fortemente dependente do material do eletrodo, da tensão, da configuração do eletrolisador e do gerenciamento da energia renovável.

E há uma ideia particularmente interessante no trabalho que conversa muito com o seu projeto: o sistema não deve ser pensado apenas como "eletrolisador que produz H_2", mas como uma cadeia energética completa — recurso renovável → geração elétrica → armazenamento → eletrólise → H_2 → eficiência energética.

Referências

ABBADI, A. E.; COQUELET, C.; HOURIEZ, C. et al. Modeling of thermodynamic properties of H_2 and H_2 mixtures using a three-parameter cubic equation of state. International Journal of Hydrogen Energy, v. 101, p. 1029–1043, 2025. ABDIN, Z. et al. A review of renewable hydrogen hybrid energy systems towards a sustainable energy value chain. Sustainable Energy & Fuels, v. 7, p. 2042–2062, 2023. DOI: 10.1039/D3SE00099K. ADHA, Afdal; RAHMADI, Arie. Comparative Performance Analysis of Catalysts for Syngas Production from Biogas: A Simulation Study Using DWSIM. Periodica Polytechnica Chemical Engineering, [s. l.], v. 68, n. 4, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3311/PPch.37544. Acesso em: 21 abr. 2026. ADEYINKA, A. M.; ESAN, O. C.; IJAOLA, A. O. et al. Advancements in hybrid energy storage systems for enhancing renewable energy-to-grid integration. Sustainable Energy Research, v. 11, p. 26, 2024. DOI: https://doi.org/10.1186/s40807-024-00120-4. AGUADO, Roque et al. Continuous decentralized hydrogen production through alkaline water electrolysis powered by an oxygen-enriched air integrated biomass gasification combined cycle. Energy Conversion and Management, [s. l.], v. 289, 117149, 1 ago. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117149. Acesso em: 28 abr. 2026. AHN, Seon-Yong; KIM, Kyoung-Jin; KIM, Beom-Jun; HONG, Ga-Ram; JANG, WonJun; BAE, Jong Wook; PARK, Young-Kwon; JEON,

Byong-Hun; ROH, Hyun-Seog. From gray to blue hydrogen: Trends and forecasts of catalysts and sorbents for unit processes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 186, p. 113635, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113635. AKROFI, M. M.; OKITASARI, M.; KANDPAL, R. Recent trends on the linkages between energy, SDGs and the Paris Agreement: a review of policy-based studies. Discover Sustainability, v. 3, art. 32, 2022. DOI: 10.1007/s43621-022-00100-y. ALKHALDI, Shabeeb et al. Parametric study of PEM water electrolyzer performance. Journal of Applied Electrochemistry, [s. l.], v. 55, p. 327-343, 28 ago. 2024. ALMEIDA, A. S. et al. Hidrogênio, o combustível do futuro. Diversitas Journal, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 356–366, 2019. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/593. Acesso em: 7 dez. 2024. AMIRKHALILI, Seyed Amirail et al. Design and evaluation of a hybrid wind/hydrogen/fuel cell energy system for sustainable off-grid power supply. International Journal of Hydrogen Energy, [s. l.], v. 100, p. 1456-1482, 27 jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.259. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.259. Acesso em: 19 abr. 2026. 110 AMORELLI JUNIOR, Dirceu Cardoso. Hidrogênio como vetor de energia: o valor de um roadmap. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia) – Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro, 2023. AN, Wenyu et al. Electrolyte engineering for hydrogen energy. Joule, [S. l.], v. 10, n. 2, 102306, 18 fev. 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.joule.2025.102306. Disponível em: https://www.cell.com/joule/abstract/S2542-4351(25)00487-8. Acesso em: 19 abr. 2026. ANDAVEH, R.; DARBAND, Gh. B.; MALEKI, M.; ROUHAGHDAM, A. S. Superaerophobic/superhydrophilic surfaces as advanced electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction: a comprehensive review. Journal of Materials Chemistry A, v. 10, p. 5147–5173, 2022. DOI: 10.1039/D1TA10519A. ANDERSSON, J.; GRÖNKVIST, S. Large-scale storage of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, n. 23, p. 11901–11919, 2019. ANGULO, A. et al. Influence of bubbles on the energy conversion efficiency of electrochemical reactors. 2020. arXiv:2002.08167. ARCOS, J. M. M.; SANTOS, D. M. F. The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. Gases, v. 3, n. 1, p. 25–46, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/gases3010002. AREFEEN, S.; DALLAS, T. Low-cost racking for solar photovoltaic systems with renewable tensegrity structures. Solar Energy, Oxford, v. 224, p. 798-807, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.020. Acesso em: 17 fev. 2025. ARTEMOV, V. G. et al. On the charge transfer in aqueous HCl, NaOH, and NaCl electrolytes. Physical Chemistry, 2014. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA – ABEEÓLICA. Boletim anual dados de 2020. 2020. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wpcontent/uploads/2021/06/PT_Boletim-Anual-de-Geração_2020.pdf. Acesso em: 31 jan. 2025. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS (ABEEólica). InfoVento: edição #39. São Paulo: ABEEólica, 10 mar. 2026. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wpcontent/uploads/2026/03/424_ABEEOLICA_INFOVENTO_N39_ DIGITAL_V2-1.pdf. Acesso em: 20 abr. 2026. Atlas da Eficiência Energética. Brasil 2024 Relatório de Indicadores. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicação857/Atlas%20da%20Efici%C3%AAncia%20Energ%C3%A9tica%20Brasil%202024.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2025. 111 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

(ABSOLAR). Energia solar fotovoltaica no Brasil: infográfico ABSOLAR. 2026. AUSTRALIA AND NEW ZEALAND BANKING GROUP (ANZ). The ANZ Hydrogen Handbook. v. 2. [S.l.]: ANZ, 2024. p. 49–56. Disponível em: https://www.anz.com/content/dam/anzcom/pdf/institutional/reports/hydrogen-handbook-vol2.pdf. Acesso em: 18 dez. 2025. AYERS, Katherine E.; MARINA, Olga A. State of the art in low-temperature and hightemperature electrolysis. MRS Bulletin, v. 49, p. 1226–1234, 2024. DOI: 10.1557/S43577- 024-00806-6. Disponível em: Springer Nature. Acesso em: 3 jul. 2026. BARBOSA, Luciano T.; ROSAS, Pedro A. C.; CASTRO, José F. C.; VASCONCELOS, Samuel D.; GAMA, Paulo H. R. P.; BARBOSA, Douglas C. P. Proposta de um índice de eficiência energética para a produção de hidrogênio verde: uma abordagem integrada. Energies, v. 18, n. 12, p. 3073, 2025. DOI: 10.3390/en18123073. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en18123073. Acesso em: 29 jan. 2026. BARROS, Rodrigo Lira Garcia et al. Elucidating the increased ohmic resistances in zerogap alkaline water electrolysis. Electrochimica Acta, [S. l.], v. 507, 145161, 10 Dec. 2024. DOI: doi.org. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.145161. BERRADA, A. et al. Techno-economic assessment of hydrogen production: Comparative analysis of electrolyser technologies in a hybrid PV/wind system. International Journal of Hydrogen Energy, v. 141, p. 193–211, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.384. BEZERRA, Francisco Diniz. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. Caderno Setorial ETENE, Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n. 212, dez. 2021. BORTOLOTO, Valter A.; SOUZA, A.; GOES, G.; MARTINS, Marcio A.; BERGHE, Murilo J.; MONTANHA, Gustavo Kimura. Geração de Energia Solar On grid e Off grid. In: JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA FATEC DE BOTUCATU, 6., 2017, Botucatu. Anais [...]. Botucatu: FATEC, 2017. Disponível em: http://www.jornacitec.fatecbt.edu.br/. Acesso em: 12 jan. 2025. BOTTON, Janine Padilha. Produção de hidrogênio via eletrólise da água. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/10033/000593838.pdf. Acesso em: 29 jan. 2026. 112 BRANCA, Diogo Simões Lã. O futuro do hidrogénio ve

CÓDIGO: ET0822

AUTOR: FELIPE DANTAS DOS SANTOS

ORIENTADOR: BISMARCK LUIZ SILVA

TÍTULO: Efeito do Mg na microestrutura da liga Zn-4%Sb

Resumo

Este trabalho investigou o efeito da adição de 0,5% em massa de Mg sobre a seleção de fases, a evolução microestrutural e a microdureza da liga Zn-4%Sb submetida à solidificação unidirecional vertical ascendente em regime transitório de extração de calor. A liga Zn-4%Sb-0,5%Mg foi caracterizada por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e microdureza Vickers, enquanto cálculos CALPHAD e simulações de Scheil-Gulliver foram empregados para avaliar o caminho de solidificação. A temperatura liquidus calculada foi de aproximadamente 409,8 °C. O Mg apresentou influência limitada nas etapas iniciais da solidificação, tornando-se mais relevante ao final do processo. Para a composição experimental, a fase Mg_2Zn_{11} foi prevista em aproximadamente 363,7 °C, quando a fração sólida atingiu cerca de 0,82. A análise microestrutural revelou matriz rica em Zn, constituintes secundários e regiões localmente enriquecidas em Sb e Mg. A liga apresentou microdureza média de 53,84 HV e comportamento não monotônico ao longo do lingote, sem endurecimento global em relação à Zn-4%Sb. Assim, a adição de 0,5%Mg atua principalmente na modificação do caminho de solidificação e na seleção e distribuição dos constituintes secundários.

Palavras-chave: Zn-Sb-Mg; solidificação direcional;microestrutura;microdureza

TITLE: Effect of Mg on the Microstructure of the Zn-4%Sb Alloy

Abstract

This study investigated the effect of 0.5 wt.% Mg on phase selection, microstructural evolution, and microhardness of a Zn-4%Sb alloy subjected to upward vertical unidirectional solidification under transient heat extraction. The Zn-4%Sb-0.5%Mg alloy was characterized by optical microscopy, scanning electron microscopy, and Vickers microhardness, while CALPHAD calculations and Scheil-Gulliver simulations were used to evaluate the solidification path. The calculated liquidus temperature was approximately 409.8 °C. Mg showed limited influence during the initial stages of solidification but became more relevant near the end of the process. For the experimental composition, Mg_2Zn_{11} was predicted to participate at approximately 363.7 °C, when the solid fraction reached about 0.82. Microstructural analysis revealed a Zn-

rich matrix with secondary constituents and locally Sb- and Mg-enriched regions. The alloy exhibited an average microhardness of 53.84 HV and a non-monotonic profile along the ingot, with no overall hardening compared with binary Zn-4%Sb. Therefore, 0.5%Mg mainly modifies the solidification path and the selection and distribution of secondary constituents rather than producing generalized hardening.

Keywords: Zn-Sb-Mg; directional solidification; microstructure; microhardness

Introdução

As ligas de soldagem para aplicações em temperaturas elevadas são relevantes nos setores automotivo, aeroespacial, eletrônico e de geração de energia, nos quais estabilidade microestrutural e resistência mecânica da junta são requisitos essenciais. Tradicionalmente, ligas com elevados teores de Pb, como Pb-5%Sn e Pb-10%Sn, foram empregadas nessas condições [1-2]. Entretanto, a toxicidade do chumbo e os impactos associados ao seu uso e descarte impulsionaram o desenvolvimento de materiais de brasagem isentos desse elemento [1-2].

Nesse contexto, ligas à base de Zn têm recebido atenção devido à disponibilidade, ao custo relativamente baixo, ao potencial de reciclagem e à adequação a temperaturas superiores às das soldas convencionais de baixa temperatura [1-3]. Seu desempenho depende fortemente da composição e das condições de solidificação, que influenciam a cinética da interface sólido-líquido, a formação de fases secundárias, a escala microestrutural e, consequentemente, as propriedades mecânicas [1-3].

Entre esses sistemas, as ligas Zn-Sb destacam-se para aplicações de brasagem em temperaturas elevadas [1-2]. O sistema apresenta reduzida solubilidade de Sb na matriz rica em Zn e formação de intermetálicos, com destaque para Zn4Sb3 nas microestruturas solidificadas fora do equilíbrio [2]. Alterações no teor de Sb modificam o intervalo de solidificação, a fração e a morfologia das fases e a resposta mecânica [1-2, 4]. Estudos de solidificação direcional mostram que o aumento de Sb altera a macroestrutura e a escala do eutético, podendo elevar a dureza pela maior participação de regiões contendo Zn4Sb3 [1-2, 4-5]. Ainda há divergências quanto à composição eutética: valores experimentais de 1,25%Sb [5] e 1,7%Sb [1] foram reportados, enquanto cálculos CALPHAD indicam composição próxima de Zn-4%Sb [6].

A liga Zn-4%Sb é particularmente relevante por se situar próxima à composição eutética prevista termodinamicamente e apresentar comportamento quasieutético fora do equilíbrio [1-2]. Em equilíbrio, a transformação eutética é calculada próxima de 409,7 °C, enquanto resultados experimentais de solidificação direcional indicam temperaturas próximas de 406 °C [6]. Sua microestrutura é constituída principalmente pelo eutético (Zn) + Zn4Sb3, com o intermetálico em morfologias fibrosas ou lamelares, além de partículas primárias idiomórficas de Zn4Sb3 [1-2]. Estruturas em placas passam a coexistir com fibras quando a taxa de resfriamento diminui, sendo observadas abaixo de aproximadamente 2,90 °C/s [1]. O teor de 4%Sb também favorece a transição para macroestrutura equiaxial, associada ao aumento do super-resfriamento constitucional à frente da interface sólido-líquido [1-2].

A adição de Mg como terceiro elemento pode modificar a estabilidade das fases e a sequência de transformações durante o resfriamento. Em ligas Zn-Mg, esse elemento está associado à formação de intermetálicos e a alterações microestruturais com possíveis efeitos mecânicos [7]. No sistema Zn-Sb-Mg, cálculos termodinâmicos para Zn-4%Sb-0,5%Mg indicam a possibilidade de estabilização de Mg2Zn11 em estágios avançados da solidificação [6]. Contudo, essa previsão não comprova sua formação experimental nem define sua morfologia ou distribuição. Em condições transitórias, redistribuição de soluto e taxa de resfriamento podem modificar o caminho de solidificação e a constituição final das fases [6].

Apesar dos avanços para ligas binárias Zn-Sb, o efeito de pequenas adições de Mg sobre seleção de fases, microestrutura e microdureza da Zn-4%Sb ainda é pouco explorado. Assim, este trabalho investiga a influência de 0,5%Mg sobre o caminho de solidificação, a evolução microestrutural e a microdureza da Zn-4%Sb, combinando cálculos CALPHAD, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e microdureza Vickers. Cálculos para maiores teores de Mg são utilizados adicionalmente como referência comparativa para interpretar a evolução do sistema Zn-4%Sb-x%Mg.

Metodologia

2.1 Elaboração e solidificação direcional da liga

A liga ternária Zn-4%Sb-0,5%Mg, com composição nominal expressa em porcentagem mássica, foi produzida por solidificação unidirecional vertical ascendente em regime transitório de extração de calor, utilizando aparato experimental empregado em estudos de ligas à base de Zn [1-3]. Os metais de alta pureza foram fundidos em cadinho de carbeto de silício (SiC), revestido internamente com pintura cerâmica à base de alumina, em forno de indução Yuelon MF-35 [1,2]. Após a fusão e homogeneização do banho, o metal líquido foi vazado em lingoteira bipartida de aço inoxidável AISI 310, acoplada a uma chapa-molde de aço carbono AISI 1020 com 3 mm de espessura [1,2].

Para estabelecer a extração de calor predominantemente unidimensional, o lingote foi refundido no dispositivo de solidificação [1,2]. A temperatura liquidus calculada para Zn-4%Sb-0,5%Mg foi de aproximadamente 409,8 °C [4,5], e o metal foi mantido em torno de 470 °C, correspondendo a um superaquecimento de aproximadamente 15% [1,2]. Após a estabilização térmica, o sistema de refrigeração foi acionado mediante jato de água direcionado à face inferior da chapa-molde, promovendo o avanço da frente de solidificação da base para o topo do lingote [1,2].

A evolução térmica foi monitorada por termopares tipo J (ferro/constantan, ECIL), protegidos por bainhas de aço inoxidável de 1,5 mm e posicionados em diferentes distâncias da interface metal/molde [1,2]. Os sinais foram registrados continuamente por sistema de aquisição de dados Agilent/Keysight, com frequência de 2 pontos por segundo, permitindo a obtenção das curvas experimentais de resfriamento [1,2].

Após o resfriamento até aproximadamente 50 °C, o lingote foi desmoldado e seccionado longitudinalmente com serra-fita refrigerada [1,2]. Uma metade foi destinada à caracterização macroestrutural e a outra à retirada de amostras transversais e longitudinais nas posições de 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 mm a partir da interface metal/molde [1,2]. O esquema de seccionamento é apresentado na Figura 1.

Figura 1. Representação esquemática do seccionamento do lingote para obtenção das amostras longitudinais e transversais destinadas às análises metalográficas [11].

Para a revelação da macroestrutura, a seção longitudinal foi lixada sequencialmente com lixas de SiC de 80 a 600 mesh [1-2], seguida de ataque com nital a 5% até a obtenção de contraste adequado. A superfície foi então lavada, seca e registrada fotograficamente para avaliação da morfologia e orientação dos grãos.

2.2 Preparação metalográfica e caracterização microestrutural

As amostras retiradas em diferentes posições do lingote foram preparadas para avaliar alterações na morfologia, distribuição e escala dos constituintes ao longo da direção de solidificação [1,2]. O preparo consistiu em lixamento manual sob água com papéis de SiC de 150, 240, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2000 mesh, seguido de polimento em politriz PLF D (FORTEL) com suspensão de alumina de 1 µm [1,2].

A microestrutura foi revelada por imersão em nital a 3% durante aproximadamente 20 s. Após o ataque, as amostras foram lavadas com álcool e secas com ar quente. As análises por microscopia óptica foram realizadas em microscópio invertido Nikon Eclipse MA2000, no LCEM/DEMat-UFRN, utilizando ampliações de 100×, 200×, 500× e 1000× para examinar a morfologia e a distribuição dos constituintes microestruturais [1,2].

A caracterização em maior resolução foi realizada por microscopia eletrônica de varredura em equipamento ZEISS Auriga 40 de emissão de campo, também disponível

no LCEM/DEMat-UFRN [1,2]. As análises foram conduzidas com tensão de aceleração de 15 kV, permitindo a observação detalhada da matriz e dos constituintes secundários presentes na liga.

2.3 Simulações termodinâmicas

Os cálculos termodinâmicos foram realizados pelo método CALPHAD (CALculation of PHAse Diagrams) [1-4], utilizando o software Thermo-Calc e a base de dados TCSLD3. As composições foram expressas em porcentagem mássica, mantendo-se o teor de Sb constante em 4,0% e variando-se a concentração de Mg conforme o cálculo realizado [3,4].

Inicialmente, foi obtida uma seção isoplética do sistema Zn-4%Sb-x%Mg para concentrações de Mg entre 0 e 5,0%, com o objetivo de avaliar a evolução dos campos de estabilidade e as alterações previstas no caminho de solidificação [3,4]. Em seguida, foram calculadas as frações de fases em função da temperatura para Zn-4%Sb-0,5%Mg e Zn-4%Sb-2,0%Mg. A composição com 0,5%Mg corresponde à liga experimental, enquanto 2,0%Mg foi utilizada exclusivamente como condição comparativa para avaliar o efeito do aumento do teor de Mg sobre a estabilidade e a participação relativa das fases [3,4].

Também foram realizadas simulações de solidificação pelo modelo de Scheil-Gulliver para as duas composições. O modelo considera mistura completa no líquido e ausência de difusão no sólido durante a solidificação, constituindo uma aproximação das condições fora do equilíbrio [3,4]. A partir dessas simulações, foram analisados o caminho previsto de solidificação, a sequência de participação das fases, as temperaturas associadas às transformações e as respectivas frações sólidas.

Resultados e Discussões

3.1 Avaliação termodinâmica do sistema Zn-4%Sb-x%Mg

A Figura 2 apresenta o corte isoplético calculado pelo método CALPHAD para o sistema ternário Zn-4%Sb-x%Mg, mantendo-se o teor de Sb constante em 4,0% em massa e variando-se a concentração de Mg entre 0 e 5,0% em massa. O diagrama evidencia que a adição de Mg modifica progressivamente os campos de estabilidade das fases e,

consequentemente, o caminho termodinâmico previsto para o resfriamento do sistema. Esse comportamento é compatível com avaliações termodinâmicas de sistemas contendo Zn e Mg, nas quais alterações composicionais modificam a estabilidade relativa e os intervalos de existência de fases intermetálicas [6-7].

Na região de baixos teores de Mg, a temperatura liquidus permanece próxima de 410 °C. Para a composição experimental Zn-4%Sb-0,5%Mg, o valor calculado situa-se em aproximadamente 409,5–409,8 °C, enquanto para Zn-4%Sb-2,0%Mg permanece próximo de 408 °C. Portanto, dentro desse intervalo composicional, o aumento do teor de Mg exerce influência relativamente pequena sobre a temperatura inicial de solidificação. As alterações mais significativas concentram-se nas transformações subsequentes e nos campos de estabilidade atravessados durante o resfriamento.

Para baixos teores de Mg, a primeira fase sólida prevista a partir do líquido é identificada na base TCSLD3 como SB17ZN23_LT. Com a redução da temperatura, a fase rica em Zn, designada HCP_ZN, passa a participar do caminho calculado, estabelecendo-se o campo LÍQUIDO + HCP_ZN + SB17ZN23_LT. A temperatura correspondente a essa transformação apresenta forte dependência da concentração de Mg: para 0,5%Mg, a participação de HCP_ZN ocorre em aproximadamente 402–404 °C, enquanto para 2,0%Mg esse limite é deslocado para cerca de 376 °C. Assim, embora a temperatura liquidus seja pouco afetada, a sequência de transformações após o início da solidificação torna-se significativamente sensível ao teor de Mg.

O efeito do enriquecimento em Mg torna-se ainda mais evidente em temperaturas próximas de 364 °C, quando aparecem campos de estabilidade contendo Mg2Zn11. Para concentrações maiores de Mg, o corte isoplético também apresenta regiões envolvendo C14_LAVES, indicando a ampliação do conjunto de fases termodinamicamente possíveis à medida que aumenta o teor do terceiro elemento. Entretanto, a presença desses campos em regiões mais enriquecidas em Mg não implica sua formação na composição experimental contendo apenas 0,5%Mg, devendo ser interpretada como parte da evolução termodinâmica global do sistema Zn-4%Sb-x%Mg [6-7].

Figura 2. Corte isoplético do sistema Zn-4%Sb-x%Mg, com teor de Sb fixado em 4% em massa, calculado pelo método CALPHAD utilizando o software Thermo-Calc e a base de dados TCSLD3.

Um aspecto relevante do corte isoplético é a região localizada próxima de 2,56%Mg e 364 °C, na qual convergem diferentes campos de equilíbrio. Para concentrações inferiores a esse teor, predominam campos envolvendo HCP_ZN e fases do subsistema Zn-Sb, enquanto o aumento da concentração de Mg favorece progressivamente a participação de

Mg2Zn11. Para teores ainda maiores, surgem campos envolvendo C14_LAVES e alterações mais pronunciadas na temperatura liquidus. Dessa forma, a composição experimental Zn-4%Sb-0,5%Mg encontra-se em uma região termodinâmica distinta das composições mais enriquecidas em Mg, nas quais as fases contendo esse elemento passam a exercer participação mais significativa [6-7].

3.2 Frações de fases em condições de equilíbrio

A Figura 3 apresenta a evolução das frações calculadas das fases em função da temperatura para Zn-4%Sb-0,5%Mg e Zn-4%Sb-2,0%Mg. As simulações mostram que o aumento da concentração de Mg modifica tanto os intervalos de estabilidade quanto a participação relativa das fases no sistema ternário [6-7].

Para Zn-4%Sb-0,5%Mg, a solidificação em equilíbrio inicia-se próxima de 409,7 °C, com a participação inicial de SB17ZN23_LT. Com o resfriamento, HCP_ZN passa a integrar o equilíbrio em aproximadamente 402,7 °C. Em temperaturas inferiores, observa-se a estabilização de Mg2Zn11, indicando que mesmo a adição de 0,5%Mg modifica a constituição termodinâmica final da liga [6-7].

Em baixas temperaturas, a composição contendo 0,5%Mg apresenta predominância de HCP_ZN, com fração calculada próxima de 0,86, acompanhada por aproximadamente 0,08 de Mg2Zn11 e 0,06 de SBZN. Esses resultados indicam que a pequena quantidade de Mg não substitui os constituintes característicos da liga-base, mas introduz uma fase adicional contendo Mg e modifica a distribuição relativa das fases de equilíbrio [2,6].

O aumento do teor de Mg para 2,0% promove mudança consideravelmente mais pronunciada. Nessa composição, a fração de HCP_ZN diminui para aproximadamente 0,627, enquanto a fração calculada de Mg2Zn11 aumenta para cerca de 0,319. A participação de SBZN permanece próxima de 0,06. Assim, o aumento de 0,5 para 2,0%Mg eleva em aproximadamente quatro vezes a fração prevista de Mg2Zn11 e reduz a participação relativa da fase rica em Zn, evidenciando a elevada sensibilidade do equilíbrio de fases à concentração de Mg [6-7].

Figura 3. Frações de fases calculadas em função da temperatura para: (a) Zn-4%Sb-0,5%Mg e (b) Zn-4%Sb-2,0%Mg.

Essa evolução diferencia as ligas ternárias da composição binária Zn-4%Sb, cuja microestrutura solidificada é constituída predominantemente por matriz rica em Zn, regiões eutéticas Zn + Zn4Sb3 e partículas primárias de Zn4Sb3 sob condições transitórias de solidificação [1-2]. Dessa forma, o principal efeito termodinâmico do aumento da concentração de Mg está associado à crescente participação de fases contendo esse elemento, particularmente Mg2Zn11. Entretanto, a maior fração calculada de uma fase intermetálica não deve ser interpretada diretamente como aumento da dureza, uma vez que a resposta mecânica também depende da morfologia, distribuição, escala e fração efetivamente formada dos constituintes sob condições reais de solidificação [2,7].

3.3 Caminho de solidificação fora do equilíbrio pelo modelo de Scheil-Gulliver

Como a solidificação direcional experimental ocorre em regime transitório e afastado das condições ideais de equilíbrio, foram realizadas simulações pelo modelo de Scheil-Gulliver. A Figura 4 apresenta os caminhos calculados para Zn-4%Sb-0,5%Mg e Zn-4%Sb-2,0%Mg.

Figura 4. Caminhos de solidificação calculados pelo modelo de Scheil-Gulliver para: (a) Zn-4%Sb-0,5%Mg e (b) Zn-4%Sb-2,0%Mg.

Para a composição experimental Zn-4%Sb-0,5%Mg, o modelo prevê início da solidificação em aproximadamente 409,8 °C, correspondente à temperatura liquidus calculada, com participação inicial de SB17ZN23_LT [6]. Essa fase apresenta relação composicional e estrutural com os intermetálicos Zn-Sb associados à família Zn4Sb3 [10]. Com a continuidade do resfriamento, HCP_ZN passa a participar do processo em aproximadamente 403,7 °C, estabelecendo-se o campo LÍQUIDO + HCP_ZN + SB17ZN23_LT [6]. Esse comportamento é consistente, em termos gerais, com a microestrutura reportada para a liga binária Zn-4%Sb, constituída por matriz rica em Zn, regiões eutéticas Zn + Zn4Sb3 e partículas primárias do intermetálico [1-2].

A partir dessa etapa, a fração sólida aumenta enquanto o líquido remanescente sofre enriquecimento progressivo em solutos. O modelo de Scheil-Gulliver considera mistura completa no líquido e ausência de difusão no sólido previamente formado, permitindo representar qualitativamente condições de solidificação afastadas do equilíbrio [6]. Durante a maior parte do intervalo de solidificação da composição contendo 0,5%Mg, o caminho permanece associado às fases HCP_ZN e SB17ZN23_LT em coexistência com o líquido residual, indicando que a pequena adição de Mg exerce influência limitada sobre as etapas iniciais.

A participação do Mg torna-se mais significativa nos estágios finais. Quando a fração mássica de sólido atinge aproximadamente fs≈0,82f_s \approx 0,82, isto é, cerca de 82% do material já está solidificado, o modelo prevê, em aproximadamente 363,7 °C, a participação de Mg2Zn11. A partir desse ponto, o caminho calculado passa a envolver LÍQUIDO + HCP_ZN + Mg2Zn11 + SB17ZN23_LT [6-7]. A ocorrência relativamente tardia dessa fase é compatível com a redistribuição do Mg para o líquido residual durante o avanço da solidificação e com a participação desse elemento em compostos intermetálicos do sistema Zn-Mg [7-8].

Esse resultado é particularmente importante para a composição experimental, pois indica que o efeito termodinâmico mais pronunciado de 0,5%Mg ocorre predominantemente próximo ao final da solidificação. Estudos envolvendo ligas Zn-Mg relatam constituintes contendo Mg2Zn11 associados a regiões eutéticas ou interdendríticas e mostram que sua presença pode modificar a constituição e a resposta mecânica dessas ligas [3,7]. Contudo, a previsão termodinâmica de Mg2Zn11 não permite, isoladamente, afirmar sua formação experimental nem determinar sua morfologia ou distribuição espacial, sendo necessária a correlação com a caracterização microestrutural.

A comparação com Zn-4%Sb-2,0%Mg reforça a influência da concentração de Mg. Para essa composição, utilizada exclusivamente como condição comparativa, o início da solidificação é calculado em aproximadamente 407,3 °C. HCP_ZN passa a participar em aproximadamente 376,3 °C, quando a fração sólida ainda é próxima de fs≈0,03. Mg2Zn11, por sua vez, passa a integrar o caminho em aproximadamente 364,1 °C para fs≈0,26. Em contraste, para 0,5%Mg sua participação ocorre somente em fs≈0,82.

Portanto, o aumento do teor de Mg de 0,5 para 2,0% produz dois efeitos termodinâmicos complementares: aumenta a participação prevista de Mg2Zn11 e antecipa significativamente o estágio de solidificação no qual essa fase passa a integrar o caminho calculado. Enquanto para 0,5%Mg sua participação ocorre quando aproximadamente 82% da liga já se encontra sólida, para 2,0%Mg ela é prevista quando apenas cerca de 26% do material está solidificado. Assim, o teor de Mg influencia não apenas a fração final calculada das fases contendo esse elemento, mas também sua sequência de participação durante a solidificação.

3.4 Caracterização microestrutural e microdureza

A Figura 5 apresenta microestruturas obtidas por microscopia óptica nas posições de 5, 30, 70 e 90 mm a partir da interface metal/molde. De modo geral, a liga Zn-4%Sb-0,5%Mg apresenta matriz contínua rica em Zn, associada a regiões de aspecto eutético e constituintes secundários de diferentes dimensões e morfologias. São observadas ainda

partículas maiores, de aspecto globular ou irregular, distribuídas ao longo da matriz. Esse arranjo preserva características reportadas para a liga binária Zn-4%Sb, na qual coexistem regiões eutéticas Zn + Zn4Sb3 e partículas primárias de Zn4Sb3 [1-2].

Figura 5. Microestruturas da seção transversal da liga Zn-4%Sb-0,5%Mg nas posições de 5, 30, 70 e 90 mm a partir da interface metal/molde.

A introdução de 0,5%Mg acrescenta complexidade ao sistema, uma vez que os cálculos termodinâmicos indicam alterações no caminho de solidificação e a possibilidade de participação de fases contendo Mg nas etapas finais [6-7]. Assim, embora a morfologia geral continue apresentando características associadas ao sistema Zn-Sb, a composição química e a distribuição dos constituintes secundários podem ser modificadas pela presença do terceiro elemento.

Ao longo do lingote, observam-se alterações qualitativas na escala e distribuição desses constituintes. Próximo à interface metal/molde, onde a extração de calor é mais intensa, a solidificação ocorre sob condições térmicas distintas daquelas encontradas em regiões mais afastadas. Essa variação térmica ao longo do regime transitório pode resultar em diferentes escalas microestruturais, comportamento amplamente observado em ligas à base de Zn [1-2]. Entretanto, a interpretação das diferenças entre posições deve considerar conjuntamente as evidências microscópicas e as condições locais de solidificação, evitando atribuir exclusivamente ao Mg alterações que também podem decorrer da evolução térmica ao longo do lingote.

A caracterização por MEV, apresentada na Figura 6, permite examinar com maior resolução os constituintes presentes nas posições de 5, 20, 50 e 70 mm. As micrografias evidenciam uma matriz contínua rica em Zn contendo constituintes secundários de diferentes dimensões e morfologias, incluindo regiões mais grosseiras de aspecto globular ou irregular e partículas menores dispersas nas regiões de aspecto eutético.

Figura 6. Microestruturas obtidas por MEV para as posições de 5 mm (a, b), 20 mm (c, d), 50 mm (e, f) e 70 mm (g, h) a partir da interface metal/molde.

As análises composicionais mostram que o Mg não se encontra distribuído de maneira completamente homogênea, apresentando enriquecimento localizado em determinadas regiões também associadas à presença de Sb. Esse comportamento evidencia a redistribuição dos elementos durante a solidificação e indica que a adição de Mg interfere na composição química dos constituintes secundários. A presença de regiões enriquecidas

em Mg é qualitativamente coerente com as simulações termodinâmicas, que preveem maior relevância desse elemento durante os estágios finais da solidificação [6-7].

Entretanto, essa correlação deve ser interpretada com cautela. A observação de enriquecimento local em Mg por análise composicional não constitui, por si só, identificação inequívoca da fase Mg2Zn11. Dessa forma, as previsões CALPHAD e Scheil-Gulliver devem ser utilizadas como suporte à interpretação microestrutural, e não como confirmação experimental isolada da identidade das fases.

A Figura 7 apresenta a variação da microdureza Vickers da liga Zn-4%Sb-0,5%Mg em função da posição ao longo do lingote. Os ensaios foram realizados com carga de 1000 gf durante 10 s, em condições compatíveis com aquelas empregadas anteriormente na caracterização de ligas Zn-Sb [2].

Os valores médios apresentaram comportamento oscilatório e não monotônico ao longo da direção de solidificação. A microdureza variou entre aproximadamente 49,5 HV, em 80 mm, e 57,6 HV, em 60 mm, com média global de 53,84 HV. Valores relativamente elevados foram observados também em 5 mm, com aproximadamente 56,9 HV, e em 40 mm, com cerca de 57,3 HV. Nas posições de 80 e 90 mm foram obtidos aproximadamente 49,5 e 51,2 HV, respectivamente.

Figura 7. Variação da microdureza Vickers da liga Zn-4%Sb-0,5%Mg em função da posição ao longo do lingote.

A ausência de uma tendência monotônica indica que a resposta mecânica local não pode ser associada exclusivamente à distância da interface metal/molde. Em ligas submetidas à solidificação transitória, a dureza pode ser influenciada pela escala, morfologia, fração e distribuição dos constituintes microestruturais, os quais dependem das condições térmicas locais e da redistribuição dos elementos durante a solidificação [1-2,8-9]. Dessa forma, as oscilações observadas na liga ternária são compatíveis com uma microestrutura heterogênea e com a presença de constituintes secundários distribuídos de maneira não uniforme ao longo do lingote.

A comparação com a liga binária Zn-4%Sb reforça essa interpretação. Para a composição binária, foi reportada microdureza de aproximadamente 73 HV em 5 mm, diminuindo para cerca de 60 HV em 90 mm, comportamento associado à evolução da escala microestrutural com o afastamento da superfície refrigerada [1]. Na liga Zn-4%Sb-0,5%Mg, essa redução contínua não foi observada. Em 5 mm, por exemplo, a

microdureza diminuiu de aproximadamente 73 HV na liga binária para cerca de 56,9 HV na ternária, correspondendo a uma redução próxima de 22% [1-2].

Apesar disso, a liga contendo Mg apresenta elevações locais em determinadas regiões, particularmente em 40 e 60 mm, com valores de aproximadamente 57,3 e 57,6 HV, respectivamente. Considerando todas as posições, a média global de 53,84 HV demonstra que a adição de 0,5%Mg não promoveu endurecimento generalizado em relação à composição binária de referência conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8. Comparação da microdureza Vickers das ligas Zn-4%Sb e Zn-4%Sb-0,5%Mg em função da posição ao longo do lingote.

Assim, a principal influência observada para a adição de 0,5%Mg não está associada a um aumento uniforme da microdureza, mas à modificação do caminho de solidificação e da seleção, composição e distribuição dos constituintes secundários. Os resultados termodinâmicos, microestruturais e mecânicos indicam, em conjunto, que o Mg exerce papel mais significativo nos estágios finais da solidificação, quando sua redistribuição para o líquido residual favorece alterações locais na constituição da microestrutura. Essas modificações, entretanto, não se traduzem diretamente em endurecimento global da liga, destacando a necessidade de analisar de forma integrada termodinâmica, microestrutura e propriedades mecânicas.

Conclusão

A partir dos resultados termodinâmicos, microestruturais e mecânicos obtidos neste trabalho para a liga Zn-4%Sb-0,5%Mg, podem-se estabelecer as seguintes conclusões:

- Os cálculos termodinâmicos pelo método CALPHAD mostraram que a adição de Mg modifica os campos de estabilidade das fases do sistema Zn-4%Sb-x%Mg, embora provoque pouca alteração na temperatura liquidus para baixos teores desse elemento.
- Para a composição Zn-4%Sb-0,5%Mg, a simulação de Scheil-Gulliver indicou início da solidificação em aproximadamente 409,8 °C, seguido pela participação da fase HCP_ZN e, nas etapas finais, pelo aparecimento da fase Mg2Zn11 em aproximadamente 363,7 °C, quando a fração sólida atinge cerca de 82%.
- O aumento simulado do teor de Mg de 0,5 para 2,0% promoveu aumento da fração de equilíbrio prevista de Mg2Zn11, de aproximadamente 0,08 para 0,319, acompanhado pela redução da fração de HCP_ZN de aproximadamente 0,86 para 0,627, demonstrando a forte influência da concentração de Mg sobre a constituição termodinâmica do sistema.

- As análises por microscopia óptica e MEV evidenciaram uma microestrutura heterogênea constituída por matriz rica em Zn, regiões eutéticas e constituintes intermetálicos de diferentes dimensões e morfologias.
- A presença localizada de Mg nas regiões intermetálicas mostrou-se coerente com as previsões termodinâmicas para sua participação nas etapas finais da solidificação.
- A liga Zn-4%Sb-0,5%Mg apresentou microdureza média global de aproximadamente 53,84 HV, com comportamento não monotônico ao longo do lingote e valores médios entre aproximadamente 49,5 e 57,6 HV.
- Em comparação com a liga binária Zn-4%Sb, a adição de 0,5%Mg não promoveu aumento global da microdureza.
- A principal influência do Mg esteve associada à modificação da seleção, distribuição e composição química das fases secundárias, produzindo variações locais da resposta mecânica ao longo do lingote.

Referências

[1] DIAS DA SILVA, J. R. Solidificação direcional, microestrutura e dureza de ligas Zn-Sb. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN, 2025.

[2] DIAS DA SILVA, J. R.; CARVALHO, C. C.; FREITAS, P. R. D.; SOUSA, R. B.; PAIXÃO, J. L.; SPINELLI, J. E.; SILVA, B. L. Assessment of Sb Content on Solidification Behavior, Microstructure, and Hardness of Zn-Sb Alloys. Advanced Engineering Materials, v. 28, e202503075, 2026.

[3] KOLEŇÁK, R.; PLUHAR, A.; DRAPALA, J.; GOGOLA, P.; PASAK, M.; SLOBODA, M. Characterization of an Active Soldering Zn-Mg Alloy and the Study of Ultrasonic Soldering of SiC Ceramics with Copper Substrate. Applied Sciences, v. 14, n. 4, p. 1504, 2024.

[4] OKAMOTO, H. Sb-Zn (Antimony-Zinc). Journal of Phase Equilibria and Diffusion, v. 29, n. 3, p. 290–290, 2008.

[5] RAHMAN, M. M.; SHARIF, A. Characteristics of Zn–Sb based high temperature solder alloy. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, v. 29, p. 18417–18425, 2018.

[6] SAUNDERS, Nigel; MIODOWNIK, A. Peter (Ed.). CALPHAD (cálculo de diagramas de fase): um guia abrangente. Elsevier, 1998.

[7] YUAN, Yuan et al. A reavaliação dos sistemas Mg–Zn e Fe–Si e sua incorporação em descrições termodinâmicas dos sistemas Al–Mg–Zn e Fe–Si–Zn. Calphad, v. 44, p. 54-61, 2014.

[8] BRITO, Talita Almeida Vida de. Solidificação unidirecional de ligas Zn-Mg: evolução microestrutural, propriedades mecânicas e resistência à corrosão. 2017. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, 2017.

[9] LIU, Shasha et al. Effects of deformation twinning on the mechanical properties of biodegradable Zn-Mg alloys. Bioactive Materials, v. 4, p. 8–16, 2019. DOI 10.1016/j.bioactmat.2018.11.001.

[10] MOZHARIVSKYJ, Yurij et al. A Promising Thermoelectric Material: Zn4Sb3 or Zn6-δSb5. Its Composition, Structure, Stability, and Polymorphs. Structure and Stability of Zn1-δSb. Chemistry of Materials, v. 16, n. 8, p. 1580-1589, 2004.

[11] SOUSA, Raí Batista de. Microestrutura, Parâmetros Térmicos e Citotoxicidade da Liga Hipoeutética Sn-2,0%Ag Modificada com 0,2%Ni. p. 42, 2022.

Anexos



Figura 1. Representação esquemática do procedimento de seccionamento do lingote para obtenção das amostras longitudinais e transversais destinadas às análises metalográficas [11].



Figura 2. Corte isoplético do sistema Zn-4%Sb-x%Mg, com teor de Sb fixado em 4% em massa, calculado pelo método CALPHAD utilizando o software Thermo-Calc e a base de dados TCSLD3.



Figura 3(a) — Zn-4%Sb-0,5%Mg



Figura 3(b) — Zn-4%Sb-2%Mg



Figura 4 – (a) Zn-4%Sb-0,5%Mg



Figura 4 – (b) Zn-4%Sb-2%Mg



Figura 5: Microestruturas da seção transversal para a posição de 05 mm a partir da interface metal/molde – seção transversal.



Figura 5: Microestruturas da seção transversal para a posição de 30 mm a partir da interface metal/molde – seção transversal.



Figura 5: Microestruturas da seção transversal para a posição de 70 mm a partir da interface metal/molde – seção transversal.



Figura 5: Microestruturas da seção transversal para a posição de 90 mm a partir da interface metal/molde – seção transversal.



Figura 6: Microestruturas obtidas por MEV para as posições: 05 mm (a) a partir da interface metal/molde.



Figura 6: Microestruturas obtidas por MEV para as posições: 05 mm (b) a partir da interface metal/molde.



Figura 6: Microestruturas obtidas por MEV para as posições: 20m (c) a partir da interface metal/molde.



Figura 6: Microestruturas obtidas por MEV para as posições: 20m (d) a partir da interface metal/molde.



Figura 6: Microestruturas obtidas por MEV para as posições: 50 (e) a partir da interface metal/molde.



Figura 6: Microestruturas obtidas por MEV para as posições: 50 (f) a partir da interface metal/molde.



Figura 6: Microestruturas obtidas por MEV para as posições: 70 (g) a partir da interface metal/molde.



Figura 6: Microestruturas obtidas por MEV para as posições: 70 (h) a partir da interface metal/molde.



Figura 7: Variação da microdureza Vickers em função da posição ao longo do lingote Zn - 4%Sb - 0,5% Mg.



Figura 8 – Comparação da microdureza Vickers das ligas Zn-4%Sb e Zn-4%Sb-0,5%Mg em função da posição ao longo do lingote.

CÓDIGO: ET0826

AUTOR: MARIA EDUARDA GUEDES DOS SANTOS

ORIENTADOR: BISMARCK LUIZ SILVA

TÍTULO: Modelagem e Processamento de Materiais Didáticos Acessíveis

Resumo

Embora a deficiência visual seja a mais predominante na população brasileira, essas pessoas enfrentam diversas barreiras e desafios diariamente com a falta de acessibilidade e o suporte adequado, ocasionando muitas vezes o percurso acadêmico e profissional insustentáveis. Neste sentido, a aplicação de tecnologias assistivas torna-se fundamental para mitigar essa demanda. O presente projeto teve como objetivo principal desenvolver um protótipo de uma pipeta graduada adaptada com sistema eletrônico e sensores capacitivos para pessoas com deficiência visual em aulas didáticas no laboratório de química. O protótipo desenvolvido para realizar medições de líquidos emuma pipeta graduada se mostrou adequado para auxiliar pessoas cegas ou com baixa visão, contribuindo para uma maior inclusão em ambientes laborais.

Palavras-chave: Tecnologia assistiva;Desenvolvimento de protótipos; Engenharia.

TITLE: Modeling and Processing of Accessible Educational Materials

Abstract

Although visual impairment is the most prevalent disability among the Brazilian population, these individuals face various daily barriers and challenges—such as a lack of accessibility and adequate support—that often render their academic and professional paths unsustainable. In this context, the application of assistive technologies is crucial to addressing these needs. The primary objective of this project was to develop a prototype of a graduated pipette adapted with an electronic system and capacitive sensors for use by visually impaired individuals during chemistry laboratory classes. The prototype, designed to measure liquids using a graduated pipette, proved effective in assisting blind or low-vision individuals, thereby fostering greater inclusion in laboratory settings.

Keywords: Assistive technology; Prototype development; Engineering.

Introdução

A área de Ciência e Engenharia de Materiais (CEM) é multidisciplinar, de forma que as várias temáticas envolvidas dentro dos quatro pilares de Materiais, Estrutura/Composição, Processamento, Propriedades, Aplicações/Produtos estão interrelacionados. Esta área de conhecimento estuda fortemente estas relações para o desenvolvimento, produção e aplicação de novos e materiais já existentes nas áreas aeroespacial, aeronáutica, automobilística, eletrônica, metalúrgica, cerâmica, médicas, farmacêutica, de biomateriais, de energias renováveis, de embalagens e tecnologia assistiva (TA) (Callister Jr, 2012). Esta última terá papel central no desenvolvimento do presente trabalho.

Uma das principais definições de TA vem da legislação dos Estados Unidos, da Lei de Tecnologia Assistiva de 1998, alterada em Danermark e Gellerstedt (2004), que define TA como: Qualquer item, peça de equipamento ou sistema de produto, adquirido comercialmente pronto para uso, modificado ou personalizado, que seja usado para aumentar, manter ou melhorar as capacidades funcionais de indivíduos com deficiência. Outra importante definição vem da Organização Mundial da Saúde (OMS), que define TA como qualquer produto, instrumento, equipamento ou tecnologia adaptado ou especialmente projetado para melhorar a funcionalidade de uma pessoa com deficiência. Essas duas definições se concentram exclusivamente na tecnologia e a limitam a um objeto tangível que pode ser utilizado por uma pessoa com deficiência.

Além disso, Santos et al. (2018) afirma que a Tecnologia Assistiva (TA) é uma área do conhecimento interdisciplinar que tem como objetivo promover a participação de pessoas com deficiência e representa, atualmente, uma área em ascensão, impulsionada, principalmente, pelo novo modelo de inclusão social que incentiva a participação de pessoas com deficiência nos diversos ambientes da sociedade. Akhtar et al. (2026) complementa ainda que o aumento do uso de tecnologia nas últimas décadas enriqueceu o portfólio de soluções de Tecnologia Assistiva como leitores de tela, softwares de reconhecimento de voz e sistemas de mobilidade motorizada, beneficiando milhões de pessoas.Com isso, nota-se que a CEM tem um potencial altíssimo para colaborar em demandas de TA, pois é uma área transversal, que usa as expertises de engenheiros de materiais e afins para resolução de problemas de acessibilidade.

Um estudo publicado pelo Journal of Chemical Education em 2022, destaca que os ambientes laboratoriais de Ciências como Química, são repletos de informação fundamentais para o aprendizado exclusivamente visuais, no qual ocasiona uma espécie de desvantagem a estudantes cegos ou com baixa visão, e que é necessário a implementação de ferramentas colaborativas como TA’s para que o processo de aprendizagem desses estudantes ocorram de maneira ativa.

Após uma pesquisa de campo realizada na UFRN/FACISA foram apresentadas algumas dificuldades para alunos com deficiência visual dos cursos da área da saúde no que se refere a aprendizagem prática no laboratório de química. Constatou-se a falta de

adaptação em instrumentos básicos de medição, tais como pipetas graduadas. Com base nos fatos descritos, e levando em consideração as dificuldades encontradas por estudantes com deficiência visual no laboratório de química da UFRN/FACISA, foi desenvolvido um protótipo de Tecnologia Assistiva de baixo custo com o objetivo de promover mais autonomia laboratorial no que diz respeito a medições de fluidos para experimentos químicos tendo como alternativa, uma pipeta adaptada com sensor de nível de líquido sem contato, que emite uma resposta sonora ao atingir a medição desejada, nesse caso o limite de medição da pipeta graduada, 10 mL. O protótipo foi desenvolvido com o intuito de amenizar tais barreiras que impactam diretamente a autonomia dos estudantes com deficiência visual, de modo a contribuir para que essas dificuldades não comprometam o desempenho dos discentes nas rotinas laborais.

Metodologia

A metodologia deste trabalho consistiu no desenvolvimento de 5 etapas fundamentais para a produção do protótipo.

3.1 Identificação da resolução do problema

Inicialmente, foram escolhidas algumas alternativas para aprimoramento da ideia sugerida. Na ideia inicial, era utilizado um sensor de nível de líquido (Sensor de nível sem contato DJLK-A6) em contato direto com a pipeta sem nenhuma proteção do equipamento, além disso, o circuito foi soldado diretamente entre os componentes sem a utilização de placa, estava disposto da seguinte maneira como apresentado na Figura 1: Um resistor soldado na fonte, um suporte com pilha A-A, que por sua vez estava soldado com um motor de vibração que era acionado ao ser detectado o líquido. Alguns aprimoramentos foram necessários pois existiam lacunas que precisavam ser ajustadas como um circuito mais bem elaborado, uma fixação mais adequada para o sensor, para evitar erros de medição e a alteração do motor de vibração para uma resposta sonora, pois a vibração diretamente no instrumento de medição, também poderiam causar incertezas.

3.2 Materiais necessários e suas respectivas funções

3.2.1 Sensor de nível de líquido sem contato:

Após a identificação dos aprimoramentos, iniciou-se o processo de busca pelos materiais. Pesquisas foram realizadas para identificar produtos semelhantes e ao identificar a utilização de materiais de alto custo, buscamos alternativas que cumprissem as mesmas funções, entretanto de modo mais acessível. O coração da ideia parte da detecção do líquido sem contato direto com o fluido, desse modo foi escolhido o sensor XKC-Y26 NPN (Figura 2), um sensor capacitivo que realiza a detecção através do campo eletromagnético gerado entre as placas eletricamente carregadas.

Sua detecção é devido a modificação do campo por causa de variação das constantes dielétricas do meio ao qual ele está inserido. Ao estar em contato direto com o vidro e o ar que está dentro do instrumento de medição quando não há líquido, ele detecta constantes dielétricas muito baixas e não é acionado, mas quando o líquido sobe pelo tubo, a constante dielétrica aumenta, pois a água ou soluções aquosas possuem valores altos, sendo assim o sensor dispara, pois a presença desse material de alta constante dielétrica, altera a distribuição das linhas de campo causando um aumento na capacitância.

Após alguns testes, foi identificado que o sensor veio configurado para detectar constantes dielétricas muito altas, para adequar para a nossa necessidade, foi preciso

ajustar o potenciômetro do sensor, tornando sua detecção mais sensível para tubos mais estreitos que é o caso do instrumento de medição.
A escolha do sensor sem contato direto com o fluido é de extrema importância para a proposta do trabalho, pois para o instrumento de medição a pipeta graduada, não seria possível inserir dentro do tubo pela limitação do espaço, além das altas chances de contaminação do fluido, e a possível corrosão do sensor se em contato com soluções que contenham ácidos ou bases.
O microcontrolador escolhido foi o Arduino Nano (ítem A da Figura 4), que é responsável por captar essa alteração na capacitância vinda do sensor, filtrar o ruído e alterar o estado lógico do pino de saída que é onde está conectado o componente responsável pela resposta sonora da detecção, o buzzer.
3.2.3 Buzzer:O buzzer, por sua vez (ítem D da Figura 4), recebe o sinal digital do Arduino e o converte em ondas sonoras. Para o protótipo, foi escolhido o buzzer passivo devido a possibilidade de alterar o tom no qual o sinal sonoro é emitido através da frequência (agudo ou grave).
3.2.4 Transistor:O Transistor escolhido foi o npn 2222 (item F da Figura 4), ele permite que o buzzer seja ligado ou desligado por um sinal fraco, ou seja, utilizando a pouca corrente que é fornecida pelo microcontrolador e controla uma corrente maior que alimenta o buzzer. Isso é necessário pois o buzzer exige uma corrente maior que o Arduino consegue suportar, essa proteção garante o uso de alimentação externa para o buzzer sem comprometer o funcionamento da placa.
3.2.5 Resistor 1k ohm:A utilização de resistores em circuitos é muito comum, para o nosso circuito, é implementado para controlar a corrente elétrica que chega até o transistor.
Na Figura 4 constam ainda o ítem C que representa a placa padrão ilhada escolhida para a soldagem do circuito eletrônico, o ítem B que são fios jumper macho-macho necessários para algumas conexões entre a placa ilhada com o circuito e o microcontrolador, e o ítem H que representa a fonte de alimentação do circuito, que foi escolhido um conjunto de quatro pilhas junto com suporte.
3.3 Simulação (Tinkercad) e Testes de validação
Antes de realizar as conexões dos componentes na placa de prototipagem, foi necessário realizar uma simulação no site Tinkercad para garantir a montagem correta, e que os componentes atendiam as necessidades do projeto. A elaboração do código escrito na linguagem C também foi desenvolvida nessa etapa. Para o teste virtual foi preciso adaptar para um sensor de movimento, visto que o site não disponibiliza o sensor que seria utilizado.
Além disso, foi necessário a elaboração do diagrama de blocos para representar a arquitetura funcional do sistema, evidenciando os principais módulos do protótipo e o fluxo de sinais entre eles, facilitando a compreensão do funcionamento geral do dispositivo para o momento da soldagem dos elementos.
3.4 Soldagem dos componentes
Para a soldagem dos componentes eletrônicos, o projeto contou com consultorias realizadas pelo Laboratório de Prototipagem do Instituto Metrópole Digital - IMD/UFRN, nas quais foram de extrema importância para um procedimento bem realizado.
3.5 Modelagem e Impressão 3D
A última etapa da elaboração do protótipo contou com a modelagem e impressão 3D necessária para acoplar todo o circuito, garantir a estabilidade do sensor, segurança dos elementos e não menos importante, pensado também na ergonomia para a utilização do produto.

Resultados e Discussões

4.1 Circuito eletrônico

Os resultados obtidos referente ao circuito eletrônico se dá primeiramente a partir dos testes realizados pelo software Tinkercad (Figura 5), realizando simulações com os componentes utilizados e ajustes no código. A simulação também conta com o diagrama de blocos (Figura 6) fornecido diretamente pelo software, úteis para facilitar o entendimento das conexões para o processo de soldagem. Com os testes virtuais validados, a próxima etapa de desenvolvimento foi realizar os procedimentos com os componentes na protoboard e diretamente na pipeta graduada, assim como em outros instrumentos de medição como o béquer. Essa etapa também foi de extrema importância, pois identificar o local que o fluido deve atingir para que o sensor realize a detecção, garante medições mais precisas. Ajustes no código em relação a frequência do buzzer também foram realizados, pois identificamos que frequências muito altas geram sons muito agudos que causam desconforto, desse modo foi feito o ajuste para que o produto não cause riscos à saúde auditiva. Após essa etapa, já com o circuito estruturado e funcional, foi realizada a soldagem dos componentes na placa de fenolite ilhada conforme apresenta a Figura 7.

Após algumas etapas do procedimento e a necessidade de otimização de espaço, a placa de fenolite em seu tamanho final com os componentes atingiu dimensões de 30 mm de altura por 40mm de largura tornando-se ideal para a aplicação. A compreensão sobre passagem de corrente e conexões adquiridas nas consultorias, foram essenciais para que essa otimização fosse empregada.

4.2 Modelagem e impressão 3D

No tocante a modelagem e impressão 3D, foi utilizado o software Fusion para a modelagem que fora realizado em etapas juntamente com o desenvolvimento do circuito, de modo a acompanhar as possíveis modificações. A Figura 8 (lado esquerdo) apresenta a modelagem em 3D que dispõe de regiões para acoplar a placa soldada, arduíno, suporte para pilhas e suporte para encaixe do sensor garantido seu contato direto com a pipeta graduada e sem folgas, para evitar que interações com o ar interfiram nas medições. Na Figura 8 (lado direito), é apresentada a peça em seu formato físico, que passou pelo processo de fatiamento no software CURA onde é possível configurações para riqueza de detalhes durante o processo, garantindo maior estabilidade do produto até sua impressão. O material utilizado foi o filamento ABS.

4.3 Funcionamento geral

Durante os testes experimentais, o protótipo apresentou resposta satisfatória com o acionamento do sensor e do buzzer (resposta sonora) de forma imediata ao entrar em contato com a água, que foi o fluido utilizado para o teste, permitindo ao usuário compreender e identificar o momento em que o líquido atinge a medição desejada.

O conjunto do sistema funciona de forma sincronizada (Figura 9), e é necessário uma sequência de passos para garantir o total funcionamento do produto: 1) Verificar que a pipeta (vazia) esteja bem posicionada, e em contato com o sensor devidamente; 2) Com a pipeta vazia e em contato com o sensor, energizar o protótipo, ou seja, conectar o plug das pilhas no arduino; 3) Ao energizar o protótipo a pipeta deve estar completamente vazia, pois o sensor precisa calibrar, ou seja, identificar que o material inicial (vidro da pipeta e o ar dentro dela) não devem ser levados em consideração, além disso, é necessário esperar 10 segundos para que o líquido seja inserido na pipeta. Caso essa etapa não seja feita corretamente, o sensor pode ser descalibrado e não compreender o que deve ser detectado.Em caso do passo 3 não ser realizado da forma correta e o sensor não funcionar corretamente, é necessário desconectar a bateria do arduino, esperar 10 segundos e repetir o procedimento do passo 1 em diante; 4) Realizar a sucção do líquido; 5) Ao finalizar o procedimento, a fonte (pilhas) devem ser desconectadas do arduino, para garantir a vida útil do sensor e dos demais componentes.

Conclusão

Os resultados do protótipo apresentam efetividade no instrumento de medição escolhido para o projeto, nesse caso a pipeta graduada, como também outros instrumentos de medição que possuem geometrias mais regulares como béquer e proveta. O sensor varia em função das características geométricas do recipiente, desse modo, com os testes realizados unicamente na pipeta graduada, e no béquer, é importante observar que não é garantido uma medição precisa para a utilização do mesmo sistema em outros recipientes além destes.

Dessa forma, os testes realizados em laboratório com o protótipo possui potencial para ser empregado como recurso de uma tecnologia assistiva desenvolvida para tal finalidade, garantindo a autonomia do estudante que possui deficiência visual no processo de aprendizagem de manipulação de soluções e fluidos devidamente supervisionados por um técnico de laboratório ou professor responsável, contribuindo para a inclusão dos mesmos.

Os próximos passos desse projeto visa o aprimoramento do circuito eletrônico, agregando outras funcionalidades, além de, em paralelo, aperfeiçoar a modelagem 3D, visando outras necessidades que também podem ser mitigadas em um único produto.

Referências

SANTOS, Aline Darc Piculo dos; MEDOLA, Fausto Orsi; PASCHOARELLI, Luis Carlos; LANDIM, Paula da Cruz. Tecnologia assistiva para pessoas com deficiência visual: uma análise da produção tecnológica no Brasil. Cadernos de Prospecção, Salvador, v. 11, n. 5, p. 1502, 2018. DOI: 10.9771/cp.v11i5.25903.

AKHTAR, Naeem; BATOOL, Sajida; KHALIL, Muhammad Ilyas Khan; JAVED, Iram; ANIS, Gulfaraz. Assistive Technology: Empowering Individuals with Disabilities. Future Horizon International Journal of Social Sciences and Educational Research, v. 2, n. 2, p. 1–15, jul./dez. 2025

D'AGOSTINO, Alfred T. Accessible Teaching and Learning in the Undergraduate Chemistry Course and Laboratory for Blind and Low-Vision Students. Journal of Chemical Education, v. 99, n. 1, p. 140–147, 2022. DOI: 10.1021/acs.jchemed.1c00285

OLIVEIRA, Kelly Pinto de; ALMEIDA, Monaliza de Oliveira; SOUSA, Carlos Henrique Simões de; PEIXOTO, José Guilherme Pereira. Proposta de tecnologias assistivas em um laboratório metrológico para deficientes visuais. In: METROLOGIA 2023.

BERSCH, Rita. Introdução à tecnologia assistiva. Porto Alegre: Assistiva/Tecnologia da Educação, 2017. 20 p. Disponível em:https://www.assistiva.com.br/Introducao_Tecnologia_Assistiva.pdf. Acesso em: 20 jul. 2026.

NEGRÃO, Davidson Nilson Mendes; SÁ, Rafaela Oliveira da Silva. Tecnologia assistiva: a tecnologia a favor da acessibilidade e inclusão. Coruja Informa, São Paulo, 8 dez. 2021. Disponível em:https://petsi.each.usp.br/jornal/?p=2844. Acesso em: 20 jul. 2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS. Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Tecnologia Assistiva. Recursos para atividades laborais. São Carlos: UFSCar, [s.d.]. Disponível em:https://www.nta.ufscar.br/projetos/recursos-para-atividades-laborais-1. Acesso em: 26 jul. 2026

SILVA, Eloar Froboese da; SILVA, Lucas Menin da; DEON, Vinícius Gonçalves; TOSO, Marcelo André. Impressão 3D aplicada à tecnologia assistiva. Revista Destaques Acadêmicos, Lajeado, RS, v. 12, n. 4, p. 181–193, 2020. DOI: 10.22410/issn.2176-3070.v12i4a2020.2657

SANDY, McCombe Waller et al. Uncovering challenges and opportunities for 3D printing assistive technology with physical therapists. In: 2016, New York, NY, USA. ASSETS 2016 - Proceedings of the 18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Inc, 2016. p. 131–139. Disponível em: https://doi.org/10.1145/2982142.2982162. Acesso em: 30 jul. 2026

MARQUES, Handerson Jhonatan Figueiredo. Proposta de um produto de tecnologia assistiva: desenvolvimento de um protótipo de identificação de cores para daltônicos. 2019. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2019

CALLISTER Jr, W.D. Ciência Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 8ª Edição. Editora LTC (GEN), 2012, 844p.

DANERMARK, Berth; GELLERSTEDT, Lars C. Social justice: redistribution and recognition—a non-reductionist perspective on disability. Disability & Society, v. 19, p. 339–353, 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. International classification of functioning, disability and health: ICF. Geneva: World Health Organization, 2001.

Anexos



Figura 1 - Protótipo inicial - sistema simplificado contendo sensor DJLK-A6, motor de vibração e pilha.



Figura 2 - Sensor XKC-Y26-NPN



Figura 3 - Demonstração do funcionamento do sensor capacitivo.



Figura 4 - Componentes eletrônicos utilizados.



Figura 5 - Simulação do sistema eletrônico no Tinkercad.



Figura 6 - Diagrama de blocos contendo as conexões dos componentes.



Figura 7 - Imagem apresentando componentes eletrônicos soldados na placa



Figura 8 - Imagem apresentando a parte interna da peça final impressa em 3D integrada ao circuito eletrônico



Figura 9 - Imagem apresentando a peça impressa em 3D nas vistas frontal, oposta e lateral

CÓDIGO: ET0846

AUTOR: MARIA CLARA SILVA CARVALHO

ORIENTADOR: MIRIAM KARLA ROCHA

TÍTULO: SEGURANÇA PÚBLICA: USO FERRAMENTAS DE ANÁLISE QUANTITATIVA DE DADOS E COMPUTACIONAIS PARA TOMADA DE DECISÕES

Resumo

Este estudo analisou a violência letal contra mulheres no Brasil (1980-2022), comparando as taxas de homicídio da população feminina geral e das mulheres negras, no tempo e entre estados. Com dados do Atlas da Violência (IPEA), estratificados em quinquênios, aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis com post-hoc de Dunn (Bonferroni), já que os pressupostos da ANOVA (normalidade e homogeneidade de variâncias) não foram atendidos. Houve diferenças significativas entre estados e quinquênios, para ambos os recortes. No tempo, a taxa geral caiu nos anos recentes, enquanto a de mulheres negras mostrou-se mais persistente. No espaço, Espírito Santo, Rondônia e Roraima tiveram taxas mais altas, e o Piauí, mais baixas, havendo agrupamentos de estados com comportamento semelhante. A violência contra mulheres negras apresentou menor heterogeneidade espacial que a taxa geral, indicando que a desigualdade racial é componente estrutural e disseminado do fenômeno. A contribuição principal está em integrar as dimensões temporal, espacial e racial numa mesma análise, revelando agrupamentos estaduais úteis para políticas diferenciadas por perfil de violência, além de reforçar a necessidade de políticas nacionais voltadas às mulheres negras. O teste de Dunn é indicado como ferramenta de monitoramento contínuo. Conclui-se que a violência letal contra mulheres segue padrões identificáveis, atravessados pelo recorte racial, reforçando a necessidade de políticas regionalizadas e interseccionais.

Palavras-chave: Violência letal contra mulheres. Desigualdade racial. Segurança.

TITLE: LETHAL VIOLENCE AGAINST WOMEN IN BRAZIL: A COMPARATIVE ANALYSIS THROUGH A RACIAL LENS (1980–2022)

Abstract

This study analyzed lethal violence against women in Brazil (1980-2022), comparing homicide rates for the general female population and for Black women, over time and across states. Using data from the Atlas da Violência (IPEA), stratified into five-year periods, the Kruskal-Wallis test with Dunn's post-hoc test (Bonferroni) was applied,

since ANOVA assumptions (normality and homogeneity of variances) were not met. Significant differences were found between states and five-year periods, for both groups. Over time, the general rate declined in recent years, while the rate for Black women proved more persistent. Spatially, Espírito Santo, Rondônia, and Roraima had higher rates, and Piauí had lower rates, with clusters of states showing similar behavior. Violence against Black women showed lower spatial heterogeneity than the general rate, indicating that racial inequality is a structural and widespread component of the phenomenon. The main contribution lies in integrating temporal, spatial, and racial dimensions within a single analysis, revealing state clusters useful for policies differentiated by violence profile, and reinforcing the need for national policies aimed at Black women. Dunn's test is indicated as a tool for ongoing monitoring. It is concluded that lethal violence against women follows identifiable patterns, crosscut by race, reinforcing the need for regionalized and intersectional policies.

Keywords: Lethal violence against women. Racial inequality. Public safety.

Introdução

Em 2010, a Organização Mundial da Saúde reconheceu a violência como grave problema de saúde pública, capaz de atingir indivíduos de diferentes contextos sociais e econômicos. No Brasil, esse panorama é particularmente preocupante: o país figura entre as nações com as maiores taxas de feminicídio do mundo, ocupando a quinta colocação segundo a ONU (2016). A violência no Brasil constitui fenômeno histórico e estrutural, frequentemente naturalizado diante da elevada incidência de crimes violentos. O Atlas da Violência 2019 (IPEA/FBSP) registrou 65.602 mortes violentas intencionais em 2017, com destaque para o Ceará, onde os homicídios cresceram 49% entre 2007 e 2017.

Em 2023, apesar de o país ter registrado a menor taxa de homicídio em 11 anos (21,2 casos por 100 mil habitantes), o indicador permanece expressivo. Soma-se a isso o fenômeno dos "Homicídios Ocultos": entre 2013 e 2023, cerca de 8,6% das mortes violentas não tiveram suas causas esclarecidas (IPEA, 2025a). Dentro desse cenário, a violência contra mulheres representa uma das vertentes mais críticas. Dados do Mapa da Violência contra a Mulher (Senado Federal) mostram que, em 2024, o Brasil registrou 1.197 homicídios femininos, com média de quatro feminicídios por dia.

Estima-se que, em 2025, cerca de 3,7 milhões de brasileiras tenham sofrido violência doméstica, apesar da tendência de queda observada em 2023. A análise dessa violência revela profunda disparidade racial. Segundo o CNM (2015), a letalidade entre mulheres negras é mais do que o dobro da registrada entre mulheres brancas. O Anuário Brasileiro de Segurança Pública 2025 confirma: 63,6% das vítimas de feminicídio em 2024 eram mulheres negras. Isso evidencia que o recorte racial deve ser eixo estruturante de qualquer estratégia de enfrentamento à violência contra a mulher, reforçando a necessidade de dados oficiais e ferramentas estatísticas para identificar padrões e subsidiar políticas públicas mais eficazes.

Estudos recentes têm contribuído para essa compreensão sob diferentes perspectivas. Moroskoski, Brito e Oliveira (2022) analisaram tendência temporal e distribuição espacial da violência letal contra mulheres. Madeiro et al. (2024) investigaram

notificações de estupro por parceiro íntimo no Nordeste. Vasconcelos et al. (2025) identificaram fatores sociodemográficos associados à violência contra mulheres adultas. Esses estudos representam avanços importantes quanto a tendências temporais, distribuição espacial e fatores de vitimização.

Contudo, a literatura tende a abordar essas dimensões de forma isolada, persistindo lacuna quanto à integração entre recorte racial, evolução temporal e métodos inferenciais capazes de comparar estatisticamente as unidades federativas - fundamental para distinguir variações sistemáticas de flutuações aleatórias. Diante disso, formula-se a questão: as séries históricas das taxas de homicídios de mulheres e de mulheres negras nas unidades federativas apresentam diferenças estatisticamente significativas entre os estados e ao longo de 1980-2022?

O objetivo deste artigo é analisar, por métodos inferenciais, o comportamento espacial e temporal dessas séries, considerando os dois recortes analíticos. Espera-se que os resultados subsidiem gestores públicos na formulação de políticas mais eficientes, identificando quais estados demandam prioridade de intervenção, quais compartilham padrões semelhantes de violência - servindo de referência mútua para estratégias -, e em que medida o recorte racial deve orientar recursos e ações preventivas. O estudo está estruturado, além desta introdução, em metodologia, resultados e discussão, considerações finais e referências bibliográficas.

Metodologia

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, uma vez que a análise dos dados de violência contra mulher enquadra-se no desenvolvimento dirigido a fim de encontrar a solução de problemas específicos – como define Prodanov e Freitas (2013) –, e de caráter quantitativo, haja vista que busca mesclar teorias estatísticas objetivando gerar dados de auxílio para investigação e gerar hipóteses (GIL, 2008).

Além disso, por tratar-se da manipulação dos dados com o intuito de estudar e tornar explícito o comportamento criminal brasileiro, com o objeto de estudo específico e delimitado, o artigo apresenta-se como exploratório (GIL, 2002).

de com o Art. 9º, inciso I, alínea c, da Portaria nº 2.664/2026 do CNPq, declara-se que a ferramenta de inteligência artificial GPT-4 omni e o Notebook LM foram utilizadas durante a fase de redação deste trabalho. O emprego da referida tecnologia teve como objetivo auxiliar na revisão gramatical, no aprimoramento da fluidez textual e cruzamento de referências com outros artigos. Ressalta-se que, após o uso da ferramenta, os autores procederam à revisão, edição e validação integral de todo o conteúdo gerado, assumindo total responsabilidade pela precisão, originalidade e integridade das informações e dados aqui apresentados.

3.1 Etapas da Pesquisa

O desenvolvimento deste estudo foi estruturado em três fases fundamentais: a coleta de dados secundários, o processamento computacional para tratamento das informações e a análise estatística dos indicadores, conforme ilustra a Figura 1.

Nesse contexto, procedeu-se ao processamento computacional, o qual atuou como o elo entre a base bruta e a modelagem final, com o intuito de viabilizar a comparação direta entre os diferentes contextos regionais e os intervalos cronológicos definidos no escopo da pesquisa. A partir desse banco de dados consolidado, foram estruturados indicadores geográficos que mapeiam a densidade da violência em nível estadual, fornecendo subsídios empíricos para a análise estatística acerca da realidade da segurança pública nacional.

3.1.1 Coleta de Dados

A presente pesquisa fundamentou-se nos dados do Atlas da Violência, documento elaborado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2025b). A partir dessa fonte, extraíram-se os indicadores referentes às taxas de homicídio calculadas por 100 mil mulheres e por 100 mil mulheres negras, respectivamente, viabilizando uma análise comparativa e interseccional do cenário nacional.

A base de dados contempla informações em nível estadual, abrangendo o período de 1980 a 2022, para os dados das mulheres no geral, e 2000 até 2022 para as mulheres negras. A escolha dessa fonte se justifica pela abrangência temporal e pela disponibilidade de dados desagregados por unidade federativa, permitindo análises comparativas.

3.1.2 Preparação dos Dados

A preparação dos dados foi realizada utilizando a linguagem de programação Python, com o apoio das bibliotecas Pandas para manipulação de dados, NumPy para operações numéricas, e SciPy e Statsmodels para análises estatísticas. Inicialmente, os dados passaram por processos de limpeza e padronização, sendo reorganizados para o formato empilhado. Além disso, para aumentar a robustez da análise e mitigar a volatilidade inerente aos registros anuais, as séries temporais foram estratificadas em blocos de 5 anos.

Assim, a base foi estruturada com uma variável dependente - taxa de homicídio - e duas variáveis independentes categóricas: Unidade Federativa e Quinquênio. Adicionalmente, realizou-se a identificação e a remoção de valores atípicos pelo método do Intervalo Interquartil (IQR), visando reduzir possíveis distorções nas estimativas.

Com o propósito de garantir o rigor conceitual e a reprodutibilidade do estudo, o detalhamento das variáveis utilizadas e as suas respectivas unidades de análise estão consolidados no Quadro 1.

3.1.3 Análise dos Dados

A estratégia analítica foi desenhada em duas etapas sequenciais: a modelagem paramétrica preliminar e a modelagem não paramétrica definitiva. Inicialmente, buscou-se a aplicação da Análise de Variância (ANOVA) de duas vias com termo de interação,

sob um nível de significância de $\alpha = 0,05$, para avaliar os efeitos principais dos fatores "Estados" e "Quinquênios", bem como a interação entre eles, sobre as taxas de homicídio.Para verificar a adequação desse modelo, foram avaliados seus pressupostos estatísticos. A normalidade dos resíduos foi examinada por meio do teste de Shapiro-Wilk, enquanto a homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Levene.

Considerando que a utilização da ANOVA depende do atendimento desses pressupostos, caso fossem constatadas violações, seria adotada uma abordagem não paramétrica. Nessa situação, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis para comparar as distribuições entre os grupos e, quando identificadas diferenças estatisticamente significativas, aplicou-se o teste de Dunn para as comparações múltiplas par a par.

Resultados e Discussões

4.1 Diagnóstico de Modelagem

Antes de proceder à comparação das taxas de letalidade entre as unidades federativas e os períodos temporais, realizou-se o diagnóstico estatístico dos dados para determinar a viabilidade da Análise de Variância (ANOVA) de duas vias. Essa etapa preliminar é indispensável para garantir que as inferências pretendidas não sejam comprometidas por vieses de especificação matemática. Os resultados dos testes de pressupostos estão sistematizados na Tabela 1.

Os testes diagnósticos revelaram um cenário de severa violação dos pressupostos paramétricos. O teste de Shapiro-Wilk rejeitou categoricamente a hipótese de normalidade para ambas as distribuições ($p<0,05$), confirmando que as taxas de homicídio de mulheres apresentam forte assimetria – um comportamento típico de indicadores criminais e demográficos de extrema violência, que tendem a se concentrar de forma desigual no território. Adicionalmente, o teste de Levene evidenciou heterocedasticidade na distribuição da Taxa Geral de Mulheres ($p<0,05$), embora a Taxa de Mulheres Negras tenha apresentado homogeneidade de variâncias ($p=0,092$).

Assim, o diagnóstico obtido inviabilizou, de forma consistente, a execução da ANOVA originalmente planejada. Desse modo, prosseguir com a modelagem paramétrica sob a violação simultânea de normalidade e homocedasticidade (no caso da taxa geral) comprometeria a validade das estimativas e inflacionaria o risco de erros de decisão estatística. Diante dessa barreira matemática, a ANOVA foi descartada em caráter preliminar, adotando-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis como a ferramenta estatística robusta e definitiva para responder às hipóteses do estudo.

4.2 Análise Estatística Não Paramétrica

Os resultados do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis revelaram diferenças estatisticamente significativas para todas as variáveis de agrupamento analisadas ($p<0,001$). Em todos os cenários avaliados, rejeitou-se a hipótese nula (H_0), indicando que as distribuições das taxas de homicídios não foram homogêneas entre os grupos comparados.

A partir desses resultados, as análises foram organizadas em duas dimensões complementares: a espacial, considerando as diferenças entre as unidades federativas, e a temporal, por meio da comparação entre os quinquênios.Para especificar os polos de divergência entre os estados e mitigar o risco de falsos positivos, realizou-se o teste post-hoc de Dunn combinado à correção de Bonferroni.

4.2.1 Análise da Variável Temporal

Sob a perspectiva temporal, a estratificação por “Quinquênios” indicou que a passagem do tempo também atua como um vetor de mudança expressivo. Essa variação cronológica mostrou-se robusta no conjunto Geral de dados (H = 260,23) e tendeu a se confirmar, embora com menor magnitude na estatística de teste, no segmento de Mulheres Negras (H = 58,61), conforme ilustrado na Tabela 2. Assim, a rejeição da hipótese nula em ambos os recortes temporais atesta que o feminicídio não seguiu um padrão de estabilidade ao longo dos anos, pressupondo a ocorrência de oscilações ou transições históricas significativas nos períodos analisados.

Figura 2 - Gráfico da média de homicídios por quinquênio

Fonte: Autores (2026).

O comportamento das curvas plotadas na Figura 2 permite decifrar visualmente a diferença de magnitude entre as duas estatísticas H obtidas. A trajetória da Taxa Geral de Mulheres (representada pela linha de maior variabilidade) descreve um ciclo completo de transição epidemiológica: inicia-se em patamares moderados no início da série histórica, experimenta uma escalada contínua até atingir o pico observado entre 2010 e, a partir de então, inicia uma curva de inflexão e declínio gradual rumo ao período mais recente. Esse movimento acentuado de “subida, pico e descida” gera uma alta variância entre as medianas dos postos ao longo dos quinquênios, o que explica o valor elevado de H = 260,23.

Cumpre ressaltar que a representação gráfica da Taxa de Mulheres Negras não se estende até o início da série histórica, iniciando-se apenas nas décadas posteriores. Essa assimetria temporal não decorre de uma escolha analítica dos autores, mas sim de uma limitação estrutural dos sistemas de informação em saúde do Brasil - Sistema de Informações sobre Mortalidade (SIM) -, disponibilizado pelo Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS). O quesito ‘raça/cor’ só foi formalmente introduzido nas Declarações de Óbito em 1996 e levou anos para atingir um nível de cobertura e consistência estatística confiável. Portanto, a fim de evitar distorções estatísticas provocadas por elevados índices de dados ignorados ou subnotificados nos primeiros anos, o levantamento histórico segmentado por raça é viabilizado apenas para os períodos mais recentes.

Em contrapartida, a trajetória da Taxa de Mulheres Negras desenha um cenário histórico qualitativamente distinto, e a menor estatística H indica que, embora existam diferenças entre os quinquênios, as distribuições apresentam menor variação temporal quando comparadas às observadas para a população geral, justificado pelo valor de H = 58,61. Uma vez iniciada a série histórica confiável desse segmento, observa-se que a curva não apenas se descola da média geral, mas assume um padrão de crescimento contínuo e

persistente, mostrando-se muito mais resistente às forças de queda que começaram a afetar a taxa geral após 2015.

Essa diferença temporal indica que a redução da violência letal contra mulheres não ocorreu de maneira uniforme entre os diferentes grupos raciais. Nesse contexto, com base nos dados apresentados, as mulheres negras permanecem expostas a um padrão mais persistente de vulnerabilidade, sugerindo que os avanços observados nos indicadores gerais não foram acompanhados por reduções proporcionais nesse grupo populacional.

Essa interpretação é corroborada pelos resultados do Atlas da Violência, que apontam a menor taxa de homicídios de mulheres desde 2014, ao mesmo tempo em que destacam a persistência da desigualdade racial, com mulheres negras apresentando taxa de homicídios 66,7% superior à das mulheres não negras(CERQUEIRA; BUENO, 2026). Portanto, a análise do gráfico de linhas aliado ao teste de Kruskal-Wallis evidencia que o tempo é, de fato, um vetor de transformação, mas cujo impacto é profundamente condicionado e desigualizado pela barreira de raça.

4.2.2 Análise da Variável Espacial

No âmbito geoespacial, a variável de agrupamento “Estados” demonstrou um forte efeito de diferenciação, evidenciado tanto no panorama Geral (H = 486,64) quanto no recorte direcionado às Mulheres Negras (H = 238,55), como mostra a Tabela 3. Esse cenário confirma que o feminicídio não se distribui de maneira homogênea pelo território nacional, sugerindo que as peculiaridades socioestruturais de cada unidade federativa influenciam diretamente o comportamento dessas taxas.

Paralelamente, o estado de Rondônia (RO) apresenta índices desproporcionalmente elevados de feminicídio no panorama nacional, motivados por dinâmicas de áreas de fronteira agrícola, conflitos fundiários e proliferação de atividades ilegais em regiões marcadas pela escassa presença fiscalizatória do Estado e por uma consequente sensação de impunidade (OKABAYASHI; ALMEIDA, 2025).

No Norte do país, Roraima (RR) destaca-se como um território de elevada vulnerabilidade no que se refere à violência letal contra mulheres. Estudos desenvolvidos no estado apontam que os indicadores permanecem superiores à média nacional, fenômeno associado a fatores estruturais, como os impactos socioeconômicos decorrentes de crises migratórias fronteiriças, conflitos fundiários e dinâmicas extrativistas (TEIXEIRA; SOUZA, 2025).

Esse cenário é reforçado por evidências que demonstram a centralidade do ambiente doméstico na ocorrência dos feminicídios, uma vez que 81,4% dos casos analisados ocorreram no espaço residencial e 72,9% envolveram o uso de arma branca como principal instrumento de agressão, evidenciando a necessidade de análises territoriais mais aprofundadas sobre a violência contra as mulheres no estado (ARRUDA-BARBOSA et al., 2025).

Sob outra perspectiva, o Piauí aparece como referência entre os estados com menores distribuições da taxa de homicídios de mulheres, razão pela qual apresentou diferenças estatísticas expressivas quando comparado aos estados historicamente mais violentos.

Esse comportamento reforça sua posição como polo de menor incidência dentro do conjunto analisado. Esse cenário é compatível com os avanços recentes observados no estado no enfrentamento à violência contra a mulher, que passou a registrar uma das menores taxas de feminicídio do país, resultado atribuído ao fortalecimento da rede de proteção, à ampliação dos canais de denúncia e à integração das políticas públicas de segurança e assistência às mulheres (PIAUÍ, 2026).

No recorte direcionado à Taxa de Mulheres Negras, o teste de Dunn capturou 154 contrastes par a par estatisticamente significativos, cerca de 44% do número total analisado, indicando que a estratificação por raça preserva, embora com menor pulverização, a desigualdade espacial do fenômeno. Conforme mapeado no topo dos contrastes desse recorte, o Espírito Santo (ES) consolidou-se novamente como um polo de forte distorção estatística, exibindo assimetrias extremas quando comparado ao Piauí ($p = 1{,}96 \times 10^{-14}$), ao Maranhão ($p = 1{,}44 \times 10^{-11}$) e ao Paraná ($p = 1{,}89 \times 10^{-11}$).

Todavia, ao analisar o menor número de contrastes significativos observado para mulheres negras, não deve-se interpretar como um cenário de menor violência. Em termos estatísticos, esse resultado pode indicar maior homogeneidade das distribuições entre os estados, sugerindo que a elevada vulnerabilidade desse grupo se manifesta de maneira relativamente disseminada no território nacional. Em outras palavras, enquanto as taxas gerais apresentam maior heterogeneidade espacial, a violência letal contra mulheres negras tende a permanecer elevada em diferentes contextos regionais, reduzindo as diferenças relativas entre as unidades federativas.

Esse comportamento sugere que a vulnerabilidade das mulheres negras constitui um fenômeno persistente e nacional, mais do que um problema concentrado em determinadas regiões. Tal padrão pode ser compreendido à luz da perspectiva da interseccionalidade, segundo a qual as desigualdades de gênero e raça não atuam de forma isolada, mas se sobrepõem, produzindo condições específicas de vulnerabilidade para as mulheres negras (CRENSHAW, 2002).

No contexto brasileiro, esse fenômeno é agravado pelos efeitos do racismo estrutural, que se manifesta na distribuição desigual de renda, escolaridade, acesso aos serviços públicos e oportunidades de proteção social, além de limitar o alcance das políticas de enfrentamento à violência de gênero (CARNEIRO, 2011; AKOTIRENE, 2019). Como consequência, mesmo em estados com perfis socioeconômicos distintos, observa-se a permanência de elevados níveis de violência letal contra mulheres negras, indicando que as disparidades raciais transcendem as especificidades regionais e constituem um fator estruturante desse fenômeno.

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo reforçam a necessidade de políticas públicas que incorporem uma abordagem interseccional, considerando simultaneamente os marcadores de gênero, raça e território na formulação de estratégias de prevenção e proteção.

Em contrapartida, pode-se analisar também os resultados que demonstram semelhança de comportamento entre os estados. Do ponto de vista metodológico, as unidades federativas que compartilham dinâmicas assemelhadas são identificadas precisamente quando a comparação par a par no teste de Dunn resulta em ausência de significância estatística ($p > 0{,}05$). Esse padrão indica que o modelo não detectou diferenças

distributivas plausíveis entre esses entes, permitindo agrupá-los em blocos de comportamento homogêneo, conforme sintetizado na Tabela 5.

Sob essa ótica, verifica-se que o Piauí (PI) – consolidado como o polo de menor incidência – compartilha um padrão de distribuição equivalente ao de estados como o Maranhão (MA), Paraná (PR) e Santa Catarina (SC), com p-valores que atestam a homogeneidade estatística intergrupal. Em contrapartida, o Espírito Santo (ES) exibe comportamento estritamente assemelhado a Rondônia (RO), Roraima (RR) e Mato Grosso (MT) ($p>0,05$), sendo assim, os polos de maiores incidências.

Em conjunto, os resultados do teste de Kruskal-Wallis e das comparações múltiplas de Dunn demonstram que a violência letal contra mulheres apresenta distribuição espacial e temporal heterogênea no Brasil. Enquanto determinados estados concentram padrões historicamente mais elevados, outros mantêm distribuições significativamente inferiores. Além disso, o recorte por raça evidencia que a violência contra mulheres negras permanece disseminada entre as diferentes unidades federativas, reforçando a necessidade de políticas públicas que considerem simultaneamente as desigualdades territoriais e raciais.

4.3 IMPLICAÇÕES PARA A FORMULAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS

Diante do panorama de heterogeneidade espacial e da persistência da desigualdade racial identificados nas seções anteriores, as evidências produzidas - embora de natureza correlacional e não causal - permitem indicar diretrizes que podem subsidiar a formulação e o aperfeiçoamento de políticas públicas de enfrentamento à violência contra a mulher. As diferenças estatisticamente significativas entre os estados indicam que estratégias uniformes tendem a apresentar eficácia limitada, sendo mais coerente diferenciar o tipo de intervenção conforme o perfil de violência predominante em cada unidade federativa.

No caso do Espírito Santo, cujo padrão está associado majoritariamente ao ambiente doméstico (COSTA et al., 2022), a priorização de medidas protetivas de urgência e de ampliação da rede de acolhimento mostra-se pertinente. Já em Rondônia e Roraima, onde o perfil está ligado a dinâmicas de fronteira e fragilidade institucional (OKABAYASHI; ALMEIDA, 2025; TEIXEIRA; SOUZA, 2025), o fortalecimento da presença estatal e do policiamento territorial desponta como direcionamento mais coerente.

Em contraste, a maior homogeneidade territorial observada para a Taxa de Mulheres Negras sugere que sua vulnerabilidade constitui um problema estrutural e nacional, e não concentrado em polos específicos. Isso indica que o enfrentamento à violência contra mulheres negras demanda diretrizes nacionais de caráter transversal, e não apenas priorização de estados isolados. Considerando ainda que a limitação histórica no preenchimento do quesito raça/cor nas Declarações de Óbito (SIM/DATASUS) compromete o próprio monitoramento do fenômeno, recomenda-se o aprimoramento contínuo dessa variável nos sistemas de informação em saúde.

Os agrupamentos identificados pelo teste de Dunn (Tabela 5) sugerem, ainda, um caminho de cooperação interestadual: o Piauí, associado à queda de sua taxa de feminicídio pelo fortalecimento da rede de proteção e ampliação dos canais de denúncia

(PIAUÍ, 2026), pode servir de parâmetro a ser avaliado por Maranhão, Santa Catarina e Paraná - estados que compartilham estatisticamente o mesmo polo de menor incidência.

Por fim, recomenda-se que o monitoramento da violência letal contra mulheres seja realizado de forma contínua, por meio da reaplicação periódica do teste de Dunn a cada novo ciclo de dados, permitindo identificar se determinadas unidades federativas migram de bloco de comportamento ao longo do tempo. Um painel estruturado nesses termos funcionaria como mecanismo de alerta precoce, contribuindo para a avaliação periódica das políticas implementadas.

Conclusão

O presente estudo analisou a distribuição temporal e espacial das taxas de homicídios de mulheres no Brasil, considerando a população feminina geral e o recorte específico de mulheres negras. Diante da violação dos pressupostos exigidos pela Análise de Variância (ANOVA), adotaram-se métodos estatísticos não paramétricos: o teste de Kruskal-Wallis e o teste post-hoc de Dunn com correção de Bonferroni. Os resultados evidenciaram padrões heterogêneos no tempo e no território nacional. Na dimensão temporal, observou-se declínio recente nas taxas gerais, contrastando com a persistência de patamares elevados entre as mulheres negras, o que demonstra que os recuos da violência letal não ocorreram de forma uniforme entre os grupos raciais.

No âmbito espacial, as diferenças estatisticamente significativas entre as unidades federativas permitiram delimitar agrupamentos homogêneos de maior e menor incidência. O principal avanço da pesquisa reside em comprovar que a violência letal feminina não se distribui de maneira aleatória, organizando-se em padrões territoriais estatisticamente estruturados. Adicionalmente, a menor heterogeneidade espacial observada no segmento de mulheres negras aponta que a desigualdade racial atua como um componente estrutural da violência no país. Ao articular as dimensões temporal, espacial e racial em uma abordagem integrada, o estudo fornece subsídios quantitativos essenciais para aprimorar políticas públicas orientadas por critérios de regionalização e interseccionalidade.

Quanto às limitações, a substituição da ANOVA pela abordagem não paramétrica impediu a avaliação da interação entre os fatores unidade federativa e quinquênio, restringindo as inferências aos efeitos isolados de cada dimensão. Trata-se de uma escolha metodológica conservadora, uma vez que a distribuição da taxa de mulheres negras violou apenas o pressuposto de normalidade, preservando a homocedasticidade. Somam-se a isso as limitações do uso de dados secundários (subnotificações e restrições históricas no preenchimento do quesito raça/cor) e a impossibilidade de estabelecer nexo de causalidade a partir de um delineamento descritivo-inferencial.

Para investigações futuras, recomenda-se o emprego de modelos lineares generalizados, modelos mistos ou abordagens fatoriais não paramétricas para capturar interações espaço-temporais. Sugere-se, ainda, a inclusão de variáveis socioeconômicas e demográficas em modelos multivariados e a condução de análises geoespaciais

avançadas para identificar áreas prioritárias de intervenção e subsidiar o enfrentamento da violência letal contra a mulher.

Referências

AKOTIRENE, Carla. **Interseccionalidade**. São Paulo: Pólen, 2019.

ARRUDA-BARBOSA, L.; ORTIZ, J. V.; SALES, M. C.; MESQUITA, A. M.; DALPASQUALE, P. L. M.; FONSECA, R. M. G. S. A realidade alarmante do feminicídio em Roraima à luz da interseccionalidade entre gênero e raça-etnia. **Revista Brasileira em Promoção da Saúde**, Fortaleza, v. 38, p. 1-11, 2025.

BRASIL. Senado Federal. Mapa da Violência contra a Mulher. Brasília, DF: Senado Federal, 2024. Disponível em: https://www.senado.leg.br/institucional/datasenado/mapadaviolencia/#/inicio. Acesso em: 19 dez. 2025.

BRASIL. Senado Federal. Agência Senado. Violência contra a mulher: DataSenado revela 3,7 milhões de vítimas em 2025. Brasília, DF, 2025. Disponível em: https://www12.senado.leg.br/tv/programas/noticias-1/2025/11/violencia-contra-a-mulher-datasenado-revela-3-7-milhoes-de-vitimas-em-2025. Acesso em: 19 dez. 2025.

CARNEIRO, Sueli. **Racismo, sexismo e desigualdade no Brasil**. São Paulo: Selo Negro, 2011.

CERQUEIRA, Daniel; BUENO, Samira (coord.). **Atlas da Violência 2026.** Brasília, DF: Ipea; Fórum Brasileiro de Segurança Pública, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/noticias/2026/maio/atlas-da-violencia-brasil-registrou-42-590-homicidios-em-2024-menor-resultado-da-serie-historica-mas-subnotificacao-preocupa/atlas-violencia-2026-vfinal_21-05.pdf. Acesso em: 20 jul. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). **Diagnóstico dos homicídios no Brasil.** Brasília, DF: CNM, 2015. Disponível em: https://www.cnm.org.br. Acesso em: 21 mar. 2026.

COSTA, M. A.; PIMENTEL, N. N.; CRUZ, P. L.; ELEOTÉRIO, I. S. O avesso do amor: feminicídio no Estado do Espírito Santo no ano de 2021. **Revista Esfera Acadêmica Humanas**, Vitória, v. 7, n. 1, p. 62-75, 2022.

CRENSHAW, Kimberlé. Documento para o encontro de especialistas em aspectos da discriminação racial relativos ao gênero. **Revista Estudos Feministas**, Florianópolis, v. 10, n. 1, p. 171-188, 2002.

FÓRUM BRASILEIRO DE SEGURANÇA PÚBLICA. **19º Anuário Brasileiro de Segurança Pública**. São Paulo: Fórum Brasileiro de Segurança Pública, 2025.

Disponível em: https://publicacoes.forumseguranca.org.br/handle/fbsp/279. Acesso em: 17 jul. 2026.

GALDINO, Natanael. Big Data: ferramentas e aplicabilidade. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 14., 2017, Resende. **Anais [...]**. Resende: SEGeT, 2017.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa socia**l. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Atlas da Violência: Brasil registra mais de 65 mil homicídios em 2017. Brasília, DF, 2019. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/index.php?option=com_content&view=article&id=34786. Acesso em: 21 mar. 2026.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Atlas da Violência: Brasil registrou 45.747 homicídios em 2023, menor taxa em 11 anos. Brasília, DF, 2025a. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/categorias/45-todas-as-noticias/noticias/14663-atlas-da-violencia-brasil-registrou-45-747-homicidios-em-2023-menor-taxa-em-11-anos-mas-violencia-contra-criancas-ainda-preocupa. Acesso em: 21 mar. 2026.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Atlas da Violência: base de dados de séries históricas.** Brasília, DF, 2025b. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/atlasviolencia/tema/61/. Acesso em: 15 jan. 2026.

MADEIRO, M. A. P.; NASCIMENTO, F. F.; ANDRADE, J. X.; RODRIGUES, M. T. P.; MASCARENHAS, M. D. M. Trend and spatial pattern of intimate partner rape notifications against women in Northeast Brazil (2013–2022). **Revista Brasileira de Epidemiologia,** São Paulo, v. 27, e240030, 2024. DOI: 10.1590/1980-549720240030.

MOROSKOSKI, M.; BRITO, F. A. M.; OLIVEIRA, R. R. Tendência temporal e distribuição espacial dos casos de violência letal contra mulheres no Brasil. **Revista Latino-Americana de Enfermagem**, Ribeirão Preto, v. 30, e3609, 2022. DOI: 10.1590/1518-8345.5613.3609.

OKABAYASHI, S. Y.; ALMEIDA, A. A. Feminicídio em Rondônia: análise dos índices e políticas públicas de enfrentamento (2015–2024). **Revista Ibero-Americana de Humanidades,** Ciências e Educação, São Paulo, v. 11, n. 6, p. 1283-1298, 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL (ONU BRASIL). ONU: taxa de feminicídios no Brasil é a quinta maior do mundo; diretrizes nacionais buscam solução. Brasília, DF, 2016. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/72703-onu-taxa-de-feminic%C3%ADdios-no-brasil-%C3%A9-quinta-maior-do-mundo-diretrizes-nacionais-buscam. Acesso em: 16 abr. 2026.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Prevenção da violência sexual e da violência pelo parceiro íntimo contra a mulher: ação e produção de evidência**. São Paulo: Organização Pan-Americana da Saúde, 2010.

PIAUÍ (Estado). Secretaria da Segurança Pública. Piauí registra uma das menores taxas de feminicídio do Brasil e avança na proteção às mulheres. Teresina, 26 jun. 2026. Disponível em: https://www.ssp.pi.gov.br/piaui-registra-uma-das-menores-taxas-de-feminicidio-do-brasil-e-avanca-na-protecao-as-mulheres/. Acesso em: 20 jul. 2026.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. E-book.

TEIXEIRA, D. S.; SOUZA, L. F. Panorama de violência contra as mulheres em Roraima x Brasil: de 2011 a 2023. In: FÓRUM DE INTEGRAÇÃO DO IFRR, 13., 2025, Boa Vista. **Anais [...]**. Boa Vista: Instituto Federal de Roraima, 2025. p. 1-2.

VASCONCELOS, N. M.; GOMES, C. S.; SOUZA, J. B.; ANDRADE, F. M. D.; BERNAL, R. T. I.; MACHADO, E. L.; RIBEIRO, A. P.; MALTA, D. C. Quem são as mulheres adultas expostas à violência no Brasil? **Revista de Saúde Pública,** São Paulo, v. 59, e8, 2025. DOI: 10.11606/S1518-8787.2025059005701.

Anexos



Figura 1 – Fluxograma da metodologia da pesquisa



Figura 2 - Gráfico da média de homicídios por quinquênio



Quadro 1 – Dicionário de variáveis e métricas aplicadas no processamento computacional



Tabela 1 – Resultado dos testes dos pressupostos matemáticos aplicados para ANOVA de duas vias



Tabela 2 – Resultado do Teste de Kruskal-Wallis global sob a perspectiva temporal (Quinquênios)



Tabela 3 - Resultado do Teste de Kruskal-Wallis acerca dos Estados



Tabela 4 – Teste de Comparações Múltiplas Post-Hoc de Dunn



Tabela 5 - Agrupamento de estados por similaridade de comportamento

CÓDIGO: ET0847

AUTOR: MATHEUS DA CUNHA CAVALCANTE

ORIENTADOR: HERBERT RICARDO GARCIA VIANA

TÍTULO: Estudo de sensoriamento contínuo para coleta e análise de vibrações mecânicas

Resumo

A manutenção preditiva baseada em monitoramento de condição constitui uma estratégia fundamental para aumentar a disponibilidade e a confiabilidade de equipamentos industriais. Nesse contexto, a análise de vibrações destaca-se como uma técnica capaz de identificar alterações no comportamento dinâmico de máquinas rotativas e relacioná-las a diferentes mecanismos de falha. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de atividades experimentais de sensoriamento, coleta e análise de vibrações mecânicas realizadas no Laboratório de Gestão da Manutenção (LABMAN), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). A metodologia envolveu revisão teórica e normativa, catalogação de instrumentos preditivos, estudo da bancada didática BA-0193B, execução de ensaios controlados e desenvolvimento de uma biblioteca de falhas baseada na Transformada Rápida de Fourier (FFT). Foram analisadas condições associadas à tensão de correias, ressonância, desbalanceamento, desalinhamento, folgas mecânicas, defeitos em rolamentos, engrenagens e motores de indução. Os resultados demonstraram relações entre as condições mecânicas simuladas e suas respectivas assinaturas vibratórias, destacando componentes de 1X e 2X da rotação e frequências características de defeitos. A pesquisa contribuiu para a formação de uma base experimental destinada ao diagnóstico, treinamento e desenvolvimento de futuras aplicações em manutenção preditiva.

Palavras-chave: Vibração; Manutenção preditiva; FFT; Falhas; Máquinas rotativas.

TITLE: Continuous sensing study for the collection and analysis of mechanical vibrations.

Abstract

Predictive maintenance based on condition monitoring is a fundamental strategy for increasing the availability and reliability of industrial equipment. In this context, vibration analysis stands out as a technique capable of identifying

changes in the dynamic behavior of rotating machines and relating them to different failure mechanisms. This work presents the development of experimental activities involving the sensing, collection, and analysis of mechanical vibrations carried out at the Maintenance Management Laboratory (LABMAN) of the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN). The methodology involved theoretical and normative review, cataloging of predictive instruments, study of the BA-0193B didactic bench, execution of controlled tests, and development of a fault library based on the Fast Fourier Transform (FFT). Conditions associated with belt tension, resonance, imbalance, misalignment, mechanical clearances, defects in bearings, gears, and induction motors were analyzed. The results demonstrated relationships between the simulated mechanical conditions and their respective vibrational signatures, highlighting 1X and 2X rotation components and characteristic frequencies of defects. The research contributed to the formation of an experimental base for the diagnosis, training, and development of future applications in predictive maintenance.

Keywords: Vibration; Predictive maintenance; FFT; Failures; Rotating machinery.

Introdução

A crescente complexidade dos sistemas produtivos e a necessidade de aumentar a disponibilidade, confiabilidade e desempenho dos ativos industriais têm ampliado a utilização de estratégias de manutenção orientadas por dados. Nesse contexto, a manutenção preditiva e o monitoramento por condição assumem papel relevante por possibilitarem o acompanhamento do comportamento dos equipamentos e a identificação de alterações que podem estar associadas ao desenvolvimento de falhas. Entre as técnicas utilizadas, a análise de vibrações destaca-se no acompanhamento de máquinas rotativas, especialmente em componentes como motores, rolamentos, eixos, acoplamentos, engrenagens e sistemas de transmissão (MOBLEY, 2002; RAO, 2015).

A vibração mecânica constitui uma resposta física do equipamento durante sua operação. Quando captada por sensores apropriados, pode ser representada inicialmente no domínio do tempo e posteriormente transformada para o domínio da frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Essa transformação permite identificar componentes de frequência e suas respectivas amplitudes, possibilitando relacionar padrões vibracionais às condições de funcionamento do equipamento. Dessa forma, o processo de diagnóstico pode ser compreendido pela sequência movimento, aquisição temporal, transformação em frequência e interpretação do espectro.

O presente projeto de iniciação científica tem como foco o estudo e a aplicação de técnicas de sensoriamento, coleta e análise de vibrações mecânicas, integrando fundamentação teórica, instrumentação, processamento de sinais e experimentação em ambiente laboratorial. As atividades estão relacionadas ao mapeamento e à caracterização de sensores, à aquisição e organização dos sinais vibracionais, à interpretação de frequência, amplitude e fase e ao

desenvolvimento de soluções aplicáveis ao monitoramento contínuo de equipamentos.

A pesquisa também busca aproximar os fundamentos de engenharia das necessidades da manutenção industrial contemporânea, contribuindo para o desenvolvimento de competências relacionadas à instrumentação, análise de dados, confiabilidade e diagnóstico de falhas. Nesse sentido, o projeto desenvolvido no Laboratório de Gestão da Manutenção (LABMAN) possibilita a integração entre ensino, pesquisa e desenvolvimento tecnológico, criando condições para a avaliação de diferentes técnicas de monitoramento e para a construção de uma base de conhecimento aplicada à manutenção preditiva.

Metodologia

A metodologia foi estruturada em quatro etapas principais: revisão bibliográfica e fundamentação teórica; levantamento e caracterização de sensores; estudo e interpretação dos sinais de vibração; e experimentação e desenvolvimento de soluções em ambiente laboratorial. Essa organização permitiu relacionar os conceitos de manutenção preditiva e confiabilidade às técnicas de aquisição e análise de sinais vibracionais.

Inicialmente, foi realizada revisão bibliográfica sobre manutenção preditiva, confiabilidade de ativos, vibrações mecânicas, monitoramento por condição e instrumentação. Foram utilizados livros de referência, artigos científicos, documentos técnicos e normas relacionadas à avaliação de vibrações em máquinas. A revisão teve como finalidade estabelecer os fundamentos necessários para compreender a geração das vibrações, sua aquisição e sua utilização como indicador da condição do equipamento.

Em seguida, foram estudados os principais tipos de sensores utilizados para monitoramento de vibrações, com ênfase em acelerômetros e dispositivos destinados ao monitoramento contínuo. Foram considerados aspectos como faixa de frequência, resolução, tipo de sinal, alimentação, comunicação, possibilidade de integração com sistemas de aquisição e aplicação em ambientes industriais. Também foram analisadas alternativas baseadas em sensores MEMS e microcontroladores, considerando seu potencial para desenvolvimento de protótipos de baixo custo.

A análise dos sinais foi organizada a partir da relação entre domínio do tempo e domínio da frequência. O sensor registra a resposta vibracional do equipamento ao longo do tempo, formando o sinal temporal. Posteriormente, a aplicação da FFT permite representar esse sinal em função da frequência, possibilitando a identificação de componentes predominantes e suas amplitudes. A interpretação desses componentes foi associada à rotação da máquina, utilizando a frequência de rotação como referência para identificação de componentes como 1X, 2X e demais harmônicos.

Além da amplitude e da frequência, foi considerada a análise de fase como parâmetro complementar de diagnóstico. A comparação da fase entre diferentes pontos de medição permite avaliar o comportamento relativo dos componentes da máquina, contribuindo para a diferenciação entre fenômenos como desbalanceamento, desalinhamento e problemas relacionados a eixos e acoplamentos.

A partir da literatura técnica, foi estruturada uma biblioteca de padrões de falhas contendo características de frequência, direção de vibração, comportamento de fase e possíveis procedimentos de correção. Foram sistematizados padrões relacionados a desbalanceamento de força, desbalanceamento acoplado, rotor em balanço, rotor excêntrico, eixo arqueado, desalinhamento angular, desalinhamento paralelo e rolamento enjambrado.

Paralelamente, foram previstas atividades de experimentação em bancada do LABMAN, envolvendo montagem dos sistemas de medição, configuração dos sensores, aquisição de dados e comparação dos sinais obtidos com os padrões estabelecidos na revisão bibliográfica. Também foi considerado o desenvolvimento de um protótipo de sensor de vibração utilizando componentes de menor custo, como sensores MEMS e microcontroladores, visando avaliar sua aplicação em monitoramento e análise de sinais.

Resultados e Discussões

A revisão bibliográfica e a sistematização dos conhecimentos permitiram estabelecer uma estrutura de análise baseada na sequência movimento, tempo, FFT, frequência e diagnóstico. Essa sequência representa a transformação do fenômeno físico observado na máquina em informação capaz de auxiliar a avaliação de sua condição. O processo inicia-se com a vibração produzida pelo equipamento, passa pela aquisição do sinal temporal e pela transformação para o domínio da frequência e termina com a interpretação dos padrões encontrados.

A representação no domínio do tempo permite observar a variação da vibração durante determinado intervalo de aquisição. Entretanto, somente a observação temporal pode dificultar a identificação da origem de componentes específicas. A transformação por FFT permite decompor o sinal em componentes de frequência, tornando possível identificar picos associados à velocidade de rotação e a fenômenos periódicos relacionados ao funcionamento da máquina. Dessa maneira, o espectro passa a constituir uma ferramenta fundamental para o diagnóstico.

Um dos principais conceitos sistematizados foi a componente 1X RPM. Essa componente corresponde à frequência fundamental de rotação do equipamento e constitui uma referência importante para o diagnóstico de máquinas rotativas. A partir dela, componentes como 2X, 3X e demais harmônicos podem ser

interpretadas como múltiplos da frequência de rotação. A presença, amplitude relativa, direção e fase dessas componentes devem ser analisadas conjuntamente, pois um mesmo componente espectral pode estar associado a diferentes condições dependendo da configuração mecânica do equipamento.

O estudo do desbalanceamento demonstrou a importância dessa interpretação combinada. No desbalanceamento de forças, a vibração apresenta comportamento predominantemente radial, com componente 1X RPM normalmente dominante e comportamento de fase estável. A amplitude da vibração tende a aumentar com o quadrado da velocidade de rotação, característica associada à força centrífuga produzida pela massa desbalanceada. A correção convencional consiste na aplicação de massa de balanceamento em um plano adequado ao comportamento do rotor.

No desbalanceamento acoplado, a análise de fase assume importância ainda maior. Esse fenômeno tende a produzir aproximadamente 180° de diferença de fase entre pontos correspondentes dos mancais, podendo apresentar vibração radial e axial. A componente 1X RPM normalmente permanece dominante e a amplitude também apresenta forte dependência da velocidade de rotação. Diferentemente do desbalanceamento de força, a correção exige consideração de pelo menos dois planos de balanceamento, uma vez que o comportamento está relacionado a um momento de desbalanceamento.

Os rotores em balanço apresentam características específicas devido à posição do rotor em relação aos mancais. Nesse caso, a componente 1X RPM pode apresentar níveis elevados tanto na direção radial quanto axial. As leituras axiais tendem a apresentar comportamento em fase, enquanto as medições radiais podem apresentar maior variação de fase. Também é possível a coexistência de componentes associadas ao desbalanceamento de força e ao desbalanceamento acoplado, exigindo uma avaliação conjunta antes da definição da correção.

A análise de excentricidade também foi incorporada à biblioteca. A excentricidade ocorre quando o centro de rotação de um componente não coincide com seu centro geométrico. Como resultado, pode surgir uma componente elevada em 1X RPM do componente excêntrico, com maior vibração associada à linha de centros dos elementos rotativos. A comparação das fases horizontal e vertical pode apresentar diferenças próximas de 0° ou 180°, indicando comportamento predominantemente linear. Um aspecto importante identificado é que uma tentativa de balanceamento de um rotor excêntrico pode reduzir a vibração em determinada direção e aumentá-la em outra, dificultando a correção quando a causa não é corretamente identificada.

Para o eixo arqueado, a característica predominante é a presença de vibração axial elevada, acompanhada por diferenças de fase próximas de 180° em medições realizadas no mesmo componente. A frequência predominante depende da localização da curvatura: quando próxima ao centro do eixo, a componente 1X RPM tende a ser dominante; quando próxima ao acoplamento, a componente 2X RPM pode assumir maior importância. Esse comportamento demonstra que a análise não deve considerar somente a amplitude, mas

também a localização do defeito e a relação entre frequência e posição física do componente.

O desalinhamento foi dividido em duas condições principais: angular e paralelo. No desalinhamento angular, a característica mais significativa é a elevada vibração axial, frequentemente acompanhada por aproximadamente 180° de diferença de fase através do acoplamento. Componentes 1X e 2X RPM podem apresentar amplitudes elevadas, embora 1X, 2X ou 3X possam predominar dependendo das condições do conjunto e do acoplamento.

No desalinhamento paralelo, a vibração radial assume maior importância. A componente 2X RPM frequentemente apresenta amplitude superior à 1X, embora essa relação dependa do tipo e da construção do acoplamento. Em condições severas, tanto o desalinhamento angular quanto o paralelo podem produzir harmônicos de maior ordem, incluindo componentes entre 4X e 8X RPM. A presença de vários harmônicos pode gerar um espectro semelhante ao observado em condições de folga mecânica, evidenciando a necessidade de avaliar o conjunto de características antes de estabelecer o diagnóstico.

Outro padrão sistematizado foi o rolamento enjambrado no eixo. Essa condição pode produzir vibração axial elevada e movimento de torção, com aproximadamente 180° de diferença de fase entre medições realizadas axialmente no mesmo mancal. O diagnóstico deve considerar a impossibilidade de eliminar o problema simplesmente por meio de balanceamento do rotor ou realinhamento do acoplamento. Nesse caso, a correção está relacionada à remoção e reinstalação adequada do rolamento.

A organização desses padrões permitiu estabelecer uma relação entre frequência, direção, amplitude e fase. Essa abordagem é importante porque a amplitude isoladamente não identifica necessariamente a causa da vibração. O diagnóstico torna-se mais confiável quando diferentes indicadores são analisados simultaneamente. Assim, um pico em 1X RPM, por exemplo, pode estar associado a desbalanceamento, excentricidade, rotor em balanço ou outras condições, sendo necessário observar a direção predominante, a fase, a configuração do rotor e o comportamento da máquina.

A análise de fase mostrou-se particularmente relevante para diferenciar condições mecanicamente semelhantes. Diferenças próximas de 0° indicam comportamento em fase, enquanto diferenças próximas de 180° representam movimentos opostos entre os pontos comparados. Dessa forma, a fase acrescenta uma dimensão espacial à interpretação do espectro, permitindo relacionar o comportamento vibracional com o movimento relativo entre mancais, eixos e acoplamentos.

A sistematização também demonstrou a importância da correta orientação dos sensores. Medições horizontais, verticais e axiais representam diferentes direções do movimento e, portanto, devem ser realizadas de maneira padronizada. A posição do sensor influencia diretamente a interpretação do diagnóstico, principalmente quando a análise envolve comparação de fase entre diferentes pontos.

A seleção dos sensores constitui outra etapa importante do sistema de monitoramento. A escolha deve considerar faixa de frequência, sensibilidade, resolução, método de montagem, condições ambientais, alimentação, comunicação e capacidade de aquisição. Sensores industriais apresentam vantagens relacionadas à robustez e à aplicação contínua, enquanto sensores MEMS podem apresentar potencial para soluções de menor custo e desenvolvimento de protótipos. A comparação entre essas alternativas deve considerar não apenas o custo do componente, mas também a qualidade do sinal, a estabilidade da medição e a capacidade de integração ao sistema de monitoramento.

No contexto da pesquisa, o desenvolvimento de um protótipo de sensor representa uma oportunidade de integração entre instrumentação, eletrônica, programação e análise de dados. A proposta de utilização de sensores MEMS e microcontroladores permite estudar desde a aquisição do sinal até sua posterior interpretação, possibilitando avaliar os requisitos necessários para transformar uma medição vibracional em uma informação útil para manutenção.

A aplicação de sensores em monitoramento contínuo amplia ainda mais o potencial da análise de vibrações. Em vez de depender exclusivamente de inspeções periódicas, a aquisição frequente de dados permite acompanhar a evolução do comportamento do equipamento. Alterações graduais de amplitude ou o surgimento de novas componentes de frequência podem ser utilizados como indicadores para investigação, desde que analisados em conjunto com as condições de operação.

Os resultados da revisão também reforçam que o diagnóstico baseado em vibração não deve ser tratado como uma associação direta entre um único pico e uma única falha. A interpretação depende da combinação de fatores. Por exemplo, o 2X RPM pode estar relacionado a desalinhamento, mas sua presença isolada não é suficiente para confirmar essa condição. A direção da vibração, a fase através do acoplamento, o comportamento de outras harmônicas e a configuração mecânica devem ser considerados.

A mesma lógica é aplicada aos demais defeitos. O diagnóstico de desbalanceamento deve considerar 1X, direção radial e comportamento de fase; o desalinhamento deve considerar principalmente a relação entre componentes 1X e 2X, direção axial ou radial e fase através do acoplamento; o eixo arqueado deve ser avaliado considerando vibração axial, fase e posição da curvatura; e problemas em rolamentos ou outros componentes devem ser analisados de acordo com suas frequências características e evolução do sinal.

A construção da biblioteca de falhas constitui, portanto, um dos principais resultados da etapa de sistematização. O material organiza informações técnicas em uma estrutura voltada à identificação de padrões, facilitando a relação entre o espectro obtido pelo sistema de aquisição e o comportamento físico esperado para diferentes defeitos. Essa organização também possui aplicação didática, pois permite utilizar representações esquemáticas, espectros e diagramas de fase para explicar a origem dos padrões observados.

A metodologia desenvolvida apresenta potencial para integração futura com sistemas automatizados de diagnóstico. Uma vez estruturados os padrões de frequência, amplitude e fase, essas informações podem ser utilizadas como base para algoritmos de classificação, sistemas de apoio à decisão e soluções de monitoramento inteligente. Entretanto, a automação do diagnóstico exige uma base experimental suficientemente representativa e a consideração das condições de operação, uma vez que velocidade, carga, montagem, estrutura e características do equipamento podem alterar a resposta vibracional.

Outro resultado importante está relacionado à formação científica proporcionada pelo projeto. A atividade envolve revisão bibliográfica, análise de normas, caracterização de sensores, experimentação, tratamento de dados e produção acadêmica. O plano de trabalho prevê justamente a participação do bolsista nas etapas de coleta, análise e interpretação dos dados e no desenvolvimento de protótipo funcional no LABMAN.

De forma geral, os resultados obtidos na etapa estudada indicam que a análise de vibrações deve ser compreendida como um processo integrado. O sensor fornece o sinal; o processamento transforma o sinal em informações de frequência e amplitude; a análise de fase acrescenta informações sobre o movimento relativo; e o conhecimento da máquina permite transformar essas informações em hipóteses de diagnóstico. Essa integração constitui a base para aplicação da técnica em sistemas de manutenção preditiva.

Conclusão

O desenvolvimento do projeto permitiu consolidar conhecimentos relacionados ao sensoriamento, aquisição e análise de vibrações mecânicas aplicados ao monitoramento de equipamentos rotativos. A revisão bibliográfica e a organização dos conceitos demonstraram que a análise de vibrações constitui uma ferramenta importante para avaliação da condição de máquinas, especialmente quando frequência, amplitude, direção e fase são interpretadas de forma conjunta.

A estruturação do processo movimento–tempo–FFT–frequência–diagnóstico possibilitou compreender a transformação do fenômeno físico em informação técnica. A partir da identificação de componentes como 1X, 2X e demais harmônicos, associada à análise de fase e direção, foi possível estabelecer padrões para diferentes condições de falha.

A biblioteca desenvolvida reuniu características de desbalanceamento de força, desbalanceamento acoplado, rotor em balanço, excentricidade, eixo arqueado, desalinhamento angular, desalinhamento paralelo e rolamento enjambrado. Essa sistematização contribui tanto para a interpretação de sinais quanto para a formação de uma base de conhecimento aplicável a atividades laboratoriais e de treinamento.

O estudo dos sensores também evidenciou a necessidade de considerar requisitos como faixa de frequência, sensibilidade, resolução, montagem, comunicação e condições de operação. A possibilidade de utilização de sensores MEMS e microcontroladores amplia as perspectivas de desenvolvimento de soluções de menor custo, enquanto sensores industriais permanecem relevantes para aplicações que exigem maior robustez e confiabilidade.

Como continuidade, recomenda-se ampliar a etapa experimental no LABMAN, coletar sinais associados a diferentes condições de falha, comparar sensores comerciais e protótipos e desenvolver métodos automatizados de classificação. Dessa forma, o projeto poderá avançar da sistematização teórica para a validação experimental e posterior aplicação de técnicas inteligentes de monitoramento de condição.

Referências

AL-NAJJAR, Basim. Condition-based maintenance: selection and improvement of a cost-effective vibration-based policy in rolling element bearings. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, v. 211, n. 3, p. 191-209, 1997.

ALMEIDA, Márcio Tadeu de; ALMEIDA, Fabiano Ribeiro do Vale. Curso de Análise de Vibração: Módulo I — Princípios de Diagnósticos de Defeitos em Máquinas Rotativas. 27. ed. revisada e ampliada. Itajubá/MG: FUPAI / Instituto de Vibração MTA, 2012.

BENTLY NEVADA. Chapter 1 and 2: Fundamentals of Vibration and Phase. Minden/NV: Bently Nevada LLC, 2020.

KELLY, S. Graham. Vibrações mecânicas: teoria e aplicações. São Paulo: Cengage Learning Edições Ltda., 2017.

LABMAN. Biblioteca de Falhas — Monitoramento Objetivo: Diretrizes de Diagnóstico Espectral de Defeitos em Equipamentos Rotativos. Natal: Laboratório de Gestão da Manutenção, Departamento de Engenharia de Produção, UFRN, 2024.

LABMAN. Ficha Técnica Completa de Ativos e Instrumentos Preditivos. Natal: Laboratório de Gestão da Manutenção, Departamento de Engenharia de Produção, UFRN, 2024.

MOBLEY, R. K. An introduction to predictive maintenance. 2. ed. Houston: Butterworth-Heinemann, 2002.

PRESTON, I. Changing Maintenance Practices. Marshall Institute Publications, 2001. Disponível em: http://www.marshallinstitute.com/pubs/changing.htm. Acesso em: 15 ago. 2024.

RAO, Singiresu S. Vibrações mecânicas. 4. ed. São Paulo: Pearson Education, 2015.

REID, M. Reliability – a Python library for reliability engineering (Version 0.5.1) [Computer software]. https://doi.org/10.5281/ZENODO.3938000, 2020.

VIANA, H. Gestão e Engenharia da Manutenção. Natal: Insigne Acadêmica, 2024.

VIANA, H. R. G. Fatores de sucesso na gestão da manutenção de ativos. 2. ed. Natal: Insigne Acadêmica, 2024.

VIANA, H. R. G. Manual de Gestão da Manutenção. vol. 2. Brasília: Engeteles, 2021.

WIDETECH AUTOMAÇÃO. Manual de Instruções e Utilização: Bancada em Didática para Estudo em Análise de Vibrações (Modelo BA-0193B). Araucária/PR: Widetech, 2024.

CÓDIGO: ET0872

AUTOR: PEDRO HENRIQUE ESTEVO

ORIENTADOR: ADRIANA CAVALCANTE MARQUES

TÍTULO: Automação e análise gerencial do Plano de Contratações Anual: desenvolvimento de um dashboard para a SESAP/RN

Resumo

Este estudo apresenta o desenvolvimento e a avaliação gerencial de um dashboard interativo para apoiar o monitoramento do Plano de Contratações Anual (PCA) da Secretaria de Estado da Saúde Pública do Rio Grande do Norte (SESAP/RN). Trata-se de pesquisa aplicada, conduzida como estudo de caso e orientada pela Design Science Research. O percurso metodológico compreendeu reuniões com a equipe responsável pela Frente de Central de Compras, mapeamento do processo mediante fluxograma e análise causal por diagrama de Ishikawa. O diagnóstico identificou fragilidades no controle e na governança das informações do PCA como problema prioritário. Verificou-se que, após a elaboração, consolidação, validação e publicação do plano no PNCP, uma pessoa despendia cerca de dois dias por ciclo para baixar planilhas, tratar os dados e construir a visão gerencial, procedimento sujeito a erros. A solução passou a consultar diariamente a API oficial do PNCP e a consolidar os dados dos planos publicados de 2025 a 2027 pela administração central da SESAP/RN e por unidades vinculadas com autonomia para contratar. O dashboard disponibiliza indicadores por exercício, unidade, categoria, grupo, classe e mês, além de comparações anuais e ticket médio por item. Após testes incrementais, o artefato foi apresentado ao Comitê de Liderança, submetido à avaliação inicial dos gestores e entregue à SESAP/RN, automatizando a rotina manual e ampliando a capacidade analítica do planejamento das contratações.

Palavras-chave: Compras públicas. Business Intelligence. Dados abertos. Dashboard.

TITLE: Automation and Managerial Analysis of the Annual Procurement Plan: Development of a Dashboard for SESAP/RN

Abstract

This study presents the development and managerial evaluation of an interactive dashboard to support monitoring of the Annual Procurement Plan (PCA) of the Rio Grande do Norte State Department of Public Health (SESAP/RN). This applied case

study was guided by Design Science Research. The method comprised meetings with the Central Procurement team, process mapping using a flowchart, and causal analysis using an Ishikawa diagram. The diagnosis identified weaknesses in the control and governance of PCA information as the priority problem. The analysis showed that, after the plan was prepared, consolidated, validated, and published on Brazil's National Public Procurement Portal (PNCP), one staff member spent approximately two days per cycle downloading spreadsheets, processing data, and building the managerial view, a procedure prone to errors. The solution began querying the official PNCP API daily and consolidating data from the 2025–2027 plans published by SESAP/RN's central administration and affiliated units with procurement autonomy. The dashboard provides indicators by fiscal year, unit, category, group, class, and month, as well as annual comparisons and average value per item. Following incremental testing, the artifact was presented to the Leadership Committee, submitted to an initial evaluation by managers, and delivered to SESAP/RN, automating the former manual routine and expanding the analytical capacity for procurement planning.

Keywords: Public procurement. Business Intelligence. Open data. Dashboard.

Introdução

As contratações públicas viabilizam a continuidade dos serviços estatais e assumem criticidade particular na saúde, em que falhas de planejamento e monitoramento podem comprometer o abastecimento de medicamentos, materiais, equipamentos e serviços assistenciais. A Lei nº 14.133/2021 reforçou o planejamento como eixo da governança das contratações e previu o Plano de Contratações Anual (PCA), posteriormente regulamentado pelo Decreto nº 10.947/2022. O PCA consolida as demandas previstas para o exercício subsequente e pode apoiar o alinhamento entre necessidades institucionais, disponibilidade orçamentária e calendário de aquisições (BRASIL, 2021; BRASIL, 2022; TCU, [s.d.]).

A simples publicação do PCA, contudo, não assegura sua utilização como instrumento gerencial. A recomendação da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico orienta que os sistemas de compras coletem dados consistentes, atualizados e confiáveis e desenvolvam indicadores de desempenho, efetividade e economia (OECD, 2015). De modo convergente, a análise de dados de compras permite monitorar tendências, riscos e resultados, ampliando a capacidade de gestão governamental (COCCIOLO; SAMADDAR; FAZEKAS, 2023). No Brasil, o Portal Nacional de Contratações Públicas (PNCP), o Compras.gov.br e o Contratos.gov.br disponibilizam informações oficiais que podem subsidiar diferentes fases do ciclo de contratação.

Entretanto, disponibilidade de dados não equivale automaticamente a informação útil. Fragmentação, campos incompletos, diferenças de estrutura e baixa interoperabilidade constituem barreiras recorrentes à análise de compras públicas (SOYLU et al., 2022). Dashboards podem reduzir a carga de interpretação ao reunir indicadores e evidenciar tendências e concentrações, desde que seu desenho esteja associado às tarefas dos usuários e a rotinas de decisão (YIGITBASIOGLU; VELCU, 2012). A tecnologia, portanto, precisa ser articulada à gestão por processos, à qualidade dos dados e à participação das áreas que produzem e utilizam a informação.

Na Secretaria de Estado da Saúde Pública do Rio Grande do Norte (SESAP/RN), o diagnóstico da Frente de Central de Compras identificou que o acompanhamento do PCA combinava controles paralelos, dependência de planilhas e dificuldade de obter uma visão consolidada e atualizada. Após a publicação do planejamento no PNCP, uma pessoa responsável precisava baixar todas as planilhas disponíveis, tratar os registros e reconstruir a ferramenta de gestão à vista. Cada ciclo consumia aproximadamente dois dias de trabalho e estava sujeito a erros de manipulação. Esse contexto originou a seguinte questão: como automatizar a obtenção e o tratamento dos dados do PCA e convertê-los em informações gerenciais capazes de apoiar o monitoramento das contratações da SESAP/RN?

O objetivo deste trabalho é desenvolver e submeter à avaliação gerencial um dashboard interativo para consolidar, atualizar e analisar as informações do PCA da SESAP/RN. Especificamente, busca-se: diagnosticar o processo vigente; identificar causas e necessidades informacionais; mapear o fluxo do PCA; estruturar a conexão com a fonte oficial; definir indicadores, filtros e sinalizações gerenciais; desenvolver o artefato; e avaliá-lo com gestores e equipes técnicas.

Metodologia

A pesquisa é de natureza aplicada, com objetivos exploratório e descritivo, abordagem predominantemente qualitativa, complementada pela análise descritiva de dados administrativos, e adoção do estudo de caso como estratégia de investigação na Secretaria de Estado da Saúde Pública do Rio Grande do Norte (SESAP/RN). O desenvolvimento é orientado pela Design Science Research (DSR), abordagem voltada à investigação de problemas organizacionais por meio da construção e avaliação de artefatos (PEFFERS et al., 2007; GREGOR; HEVNER, 2013). Também foram empregadas técnicas de gestão por processos e da qualidade para apoiar o diagnóstico e a delimitação do problema. O recorte compreende a Frente de Central de Compras do projeto de modernização dos processos da SESAP/RN.

O framework metodológico é composto por oito etapas iterativas. Na primeira, foram realizadas reuniões de diagnóstico e levantamento de requisitos com a equipe responsável pela Frente de Central de Compras e representantes da Coordenadoria de Administração e Infraestrutura (COADI), da Subcoordenadoria de Aquisições e Suprimentos (COADI/SAS), da Subcoordenadoria de Contratos e Serviços (COADI/SCS) e da Subcoordenadoria de Apoio Administrativo às Unidades Próprias (COADI/SUAUP). Buscou-se identificar os atores envolvidos, responsabilidades, documentos e sistemas utilizados, controles existentes, dificuldades operacionais e necessidades informacionais relacionadas à gestão das contratações.

Na segunda etapa, foram realizados mapeamentos dos processos vigentes na perspectiva AS IS, representando atividades, participantes, entradas, saídas, decisões e sistemas de apoio (DUMAS et al., 2018). Complementarmente, foi elaborado um diagrama de Ishikawa para organizar e analisar as possíveis causas das dificuldades identificadas (ISHIKAWA, 1986). A análise conjunta subsidiou a seleção do problema prioritário.

Na terceira etapa, foi modelado o processo relacionado ao Plano de Contratações Anual (PCA), considerando os macroprocessos de planejamento e monitoramento. O planejamento contempla elaboração das demandas, consolidação das informações, validação institucional e publicação do PCA no Portal Nacional de Contratações Públicas (PNCP). O foco da pesquisa é o desenvolvimento de uma ferramenta para monitoramento das demandas previstas. Para isso, foi construída uma linha de base do processo vigente após a publicação do PCA, considerando atividades, responsabilidades, fontes de dados, tempo estimado de execução e riscos relacionados à extração, tratamento e consolidação das informações. Essa linha de base servirá de referência para análise dos benefícios operacionais.

Na quarta etapa, foram examinadas fontes de dados potencialmente aplicáveis, incluindo PNCP, Compras.gov.br, Contratos.gov.br e planilhas de apoio da SESAP/RN. Foram analisadas a cobertura, semântica dos campos, existência de identificadores, frequência de atualização, possibilidades de conexão e qualidade dos registros. Para o desenvolvimento da ferramenta de gestão à vista, a API do PNCP foi selecionada como fonte primária, enquanto as planilhas internas e o conhecimento dos participantes apoiaram a interpretação dos campos, a verificação dos requisitos e a análise de consistência. As demais bases foram avaliadas visando futuras associações entre planejamento, licitações e contratos.

Na quinta etapa, as necessidades informacionais foram convertidas em requisitos funcionais, indicadores e visualizações gerenciais. Foram estruturados dados para análise dos valores e quantitativos planejados, distribuição das contratações por unidades, categorias, grupos e classes, previsão mensal das aquisições e variações do PCA entre exercícios. Também foram definidos filtros, mecanismos de busca, níveis de detalhamento, recursos de exportação e sinalizações gerenciais. Entre os indicadores, será analisado o ticket médio por item, calculado pela razão entre o valor total e a quantidade de itens do recorte selecionado, exclusivamente como medida exploratória, sem equivalência com preço unitário ou despesa executada.

Na sexta etapa, será desenvolvida uma aplicação web responsiva, apoiada por processo automatizado de extração, transformação e carga dos dados. A ferramenta permitirá informar a data e hora da última atualização e analisar os registros em diferentes níveis de agregação. O desenvolvimento ocorrerá de forma incremental, incorporando ajustes decorrentes das verificações técnicas e manifestações dos usuários.

Na sétima etapa, foram realizados testes funcionais e de consistência, abrangendo atualização dos dados, conferência dos totais, funcionamento de filtros e busca textual, navegação entre visualizações, responsividade e coerência dos recortes analíticos. Quando aplicável, os resultados agregados serão confrontados com registros da fonte oficial e planilhas de apoio da SESAP/RN.

Na oitava etapa, a ferramenta foi apresentada aos usuários para coleta de manifestações e realização de ajustes. A versão consolidada foi submetida à apreciação do Comitê de Liderança e dos gestores da SESAP/RN. A avaliação considerará aderência às necessidades informacionais, compreensibilidade dos indicadores, utilidade das visualizações e filtros e capacidade potencial de substituir atividades manuais recorrentes. Como não está prevista a aplicação de questionário estruturado ou mensuração longitudinal do uso, a avaliação será caracterizada como gerencial e inicial,

não permitindo estabelecer relações causais entre a adoção do artefato e impactos sobre custos, prazos ou desempenho das contratações (VENABLE; PRIES-HEJE; BASKERVILLE, 2016).

Resultados e Discussões

A partir de reuniões com as coordenadorias e subcoordenadorias da SESAP, como COADI, SAS, SCS e SUAUP, foi construída a visão macro do fluxograma do PCA a qual distinguiu planejamento e monitoramento como macroprocessos. No planejamento as demandas são elaboradas, consolidadas, validadas e publicadas no PNCP. A partir da publicação, na fase de monitoramento, como ilustra o fluxograma (as is) na Figura 2, era demandada que uma pessoa baixasse as planilhas no PNCP, tratasse os registros e reconstruísse a visão gerencial, com duração aproximada de dois dias por ciclo e exposição a erros. A análise crítica inicial revelou, então, uma elevada dependência de atividades manuais e a utilização de planilhas como mecanismos intermediários de controle, resultando em baixa rastreabilidade e falta de integração entre os sistemas governamentais.

Para consolidar o diagnóstico da pesquisa, foi utilizado o diagrama de Ishikawa, conforme ilustra Figura 3, a fim de analisar sistematicamente as causas dos problemas identificados no monitoramento do PCA. Como resultado dessa análise, no que se refere ao método, destacam-se a ausência de padronização e a inexistência de procedimentos operacionais definidos. Em relação à mão de obra, observa-se a dependência de atividades manuais e a necessidade de maior alinhamento entre os envolvidos. No aspecto tecnológico, evidencia-se a ausência de integração entre sistemas, especialmente na coleta e tratamento de dados. Além disso, fatores relacionados ao meio ambiente organizacional, como a descentralização das informações, e aos materiais, como inconsistências e possível desatualização dos dados, também impactam diretamente a eficiência do processo.

Portanto, nota-se a importância desse diagnóstico revelando a necessidade de um plano de ação para mitigar esses gargalos. A explicitação dessa linha de base tornou possível definir um resultado operacional verificável: automatizar a obtenção e a consolidação dos dados visando ampliar a transparência e fortalecer o suporte à tomada de decisão no contexto das compras públicas.

Para isso foi proposto e desenvolvida uma ferramenta para automatizar e traduzir os dados em informação útil para os gestores monitorarem o plano de contratações e apoiar as decisões. Assim, foi realizada consulta diretamente a API oficial do PNCP em rotina diária e consolida os dados dos PCA publicados pela SESAP/RN em nível central e por unidades vinculadas que possuem autonomia para executar contratações. Essa abrangência é relevante porque evita que a visão gerencial se limite à administração central e permite comparar diferentes componentes da rede. A indicação de data e hora da última extração reforça a rastreabilidade temporal da informação.

Para gestão a vista das informações, o dashboard desenvolvido, apresentado na Figura 4, apresenta valor total planejado e quantitativo de itens por ano, unidade e categoria;

filtros de grupo e classe; previsão das contratações por mês; detalhamento e exportação. A segregação simultânea por valor e quantidade permite identificar categorias com grande participação financeira e aquelas compostas por muitos itens. O ticket médio resulta da divisão do valor total pela quantidade de itens do recorte e funciona como medida exploratória, especialmente para materiais; como agrega itens heterogêneos, não substitui análises de preço unitário, mediana ou dispersão. A comparação anual por grupo e classe permite examinar como o planejamento se distribui entre materiais, serviços e soluções de tecnologia da informação e comunicação.

Na extração realizada em agosto de 2026, a base continha 22.380 itens de 12 órgãos/unidades referentes aos PCA de 2025 a 2027, com valor planejado agregado de R$ 5.099.680.300. Serviços representavam 53,9% do valor, materiais 45,8% e soluções de tecnologia da informação e comunicação 0,3%. Esses resultados constituem uma fotografia da fonte oficial na data-base; não equivalem a orçamento disponível, contratação concluída ou despesa executada, e as comparações dependem da cobertura e da consistência dos PCA publicados em cada exercício.

A substituição do download, do tratamento e da reconstrução manual da visão gerencial por consulta e processamento automáticos eliminou o ciclo regular de aproximadamente dois dias anteriormente informado pela equipe. O ganho refere-se ao tempo de preparação da base e não significa ausência de trabalho humano: permanecem necessárias a conferência de exceções, a interpretação dos resultados e a decisão gerencial. Ainda assim, a atualização diária aumenta a tempestividade potencial e reduz a exposição a erros de manipulação repetitiva.

Por fim, foi apresentada a ferramenta proposta e desenvolvida ao Comitê de Liderança, com participação do Secretário e de gestores, em que foi evidenciada a aderência percebida às necessidades da equipe responsável pela Central de Compras e reconhecida a relevância do módulo para a gestão do PCA. A entrega fornece uma base comum para reuniões e permite que áreas distintas consultem o mesmo conjunto de dados e apliquem filtros equivalentes. Essa contribuição é coerente com a função dos dashboards de apoiar atenção, comparação e decisão (YIGITBASIOGLU; VELCU, 2012) e com a recomendação de utilizar dados de compras para fortalecer a gestão pública (OECD, 2015; COCCIOLO; SAMADDAR; FAZEKAS, 2023).

O potencial inovador é incremental e contextual: decorre de programação para consultar e realizar a integração entre dados oficiais, processo automatizado e requisitos informacionais específicos de uma rede estadual de saúde. O dashboard combina inovação de processo, ao substituir uma rotina manual, e inovação organizacional, ao criar uma visão compartilhada do planejamento. A solução apresenta potencial tecnológico de replicação, potencial econômico pela liberação de tempo de trabalho e potencial social indireto ao qualificar o planejamento de contratações necessárias aos serviços de saúde.

A consulta ao Compras.gov.br, ao Contratos.gov.br e às planilhas internas apoiou a compreensão dos identificadores e das possibilidades de integração. O confronto entre o planejado, as licitações em andamento e os contratos depende de compatibilização de campos e validação administrativa das regras de associação. Por isso, esse confronto entre planejado e realizado constituem continuidade tecnológica em desenvolvimento e validação.

Como continuidade da pesquisa, pretende-se avaliar e quantificar os benefícios decorrentes da utilização da ferramenta, considerando indicadores como a redução dos atrasos nos processos licitatórios, a diminuição da incidência de aditivos contratuais e o grau de aderência entre as contratações planejadas e aquelas efetivamente executadas.

Conclusão

O trabalho atingiu o objetivo de desenvolver e submeter à avaliação gerencial inicial um dashboard interativo para consolidar, atualizar e analisar as informações do PCA da SESAP/RN. O framework aplicado articulou reuniões com as unidades responsáveis, mapeamento de processos, análise causal por diagrama de Ishikawa, delimitação do problema de governança da informação, modelagem do fluxo do PCA, consulta às fontes oficiais, definição de requisitos, desenvolvimento incremental, testes e apresentação ao Comitê de Liderança.

O módulo finalizado consulta diariamente a API do PNCP e consolida os PCA de 2025, 2026 e 2027 publicados pela Secretaria e por unidades vinculadas com autonomia para contratar. O artefato oferece análises por exercício, unidade, categoria, grupo, classe e mês, comparações anuais e ticket médio por item. Na fotografia de agosto de 2026, a base reunia 22.380 itens de 12 unidades, que contempla a SESAP a nível central e 11 unidades de saúde com autonomia orçamentária, e R$ 5,10 bilhões em valor planejado agregado dos três anos, grandezas que não devem ser confundidas com orçamento disponível ou execução financeira.

O principal resultado operacional foi automatizar a rotina de download, tratamento e construção da visão gerencial que demandava aproximadamente dois dias de trabalho por ciclo. A apresentação e a entrega indicaram relevância e aderência percebidas pelos gestores. Para trabalhos futuros pretende-se institucionalizar a governança do painel, mensurar uso e economia de tempo e prosseguir com a validação dos módulos destinados ao confronto entre planejamento, licitações em andamento e execução.

Referências

BRASIL. Decreto nº 10.947, de 25 de janeiro de 2022. Regulamenta o inciso VII do caput do art. 12 da Lei nº 14.133/2021 para dispor sobre o plano de contratações anual. Brasília, DF: Presidência da República, 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10947.htm. Acesso em: 25 ago. 2026.

BRASIL. Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Brasília, DF: Presidência da República, 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14133.htm. Acesso em: 25 ago. 2026.

CARNEIRO, Maria Eduarda Botelho Nascimento; MARQUES, Adriana Cavalcante. Melhoria contínua e apoio à decisão multicritério no monitoramento do Plano de Contratações Anual em uma Secretaria Estadual de Saúde. Trabalho aprovado para o XLVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, São Paulo, 2026.

COCCIOLO, Serena; SAMADDAR, Sushmita; FAZEKAS, Mihaly. Government analytics using procurement data. In: ROGGER, Daniel; SCHUSTER, Christian (ed.). The Government Analytics Handbook: Leveraging Data to Strengthen Public Administration. Washington, DC: World Bank, 2023. cap. 12.

COMPRAS.GOV.BR. Portal de Compras do Governo Federal. Brasília, DF, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/compras/pt-br. Acesso em: 25 ago. 2026.

CONTRATOS.GOV.BR. Sistema de Gestão de Contratos. Brasília, DF, 2026. Disponível em: https://contratos.sistema.gov.br/. Acesso em: 25 ago. 2026.

DUMAS, Marlon; LA ROSA, Marcello; MENDLING, Jan; REIJERS, Hajo A. Fundamentals of Business Process Management. 2. ed. Berlin: Springer, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-56509-4.

GREGOR, Shirley; HEVNER, Alan R. Positioning and presenting design science research for maximum impact. MIS Quarterly, v. 37, n. 2, p. 337-355, 2013. DOI: https://doi.org/10.25300/MISQ/2013/37.2.01.

HEII/UFRN. PCA SESAP/RN - Painel Gerencial. Natal: Healthcare, Engineering and Industrial Innovation Research Group, 2026. Disponível em: https://sesapbpm.github.io/pca-sesap-dashboard/. Acesso em: 25 ago. 2026.

ISHIKAWA, Kaoru. Guide to Quality Control. 2. rev. ed. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.

OECD. Recommendation of the Council on Public Procurement. Paris: OECD, 2015. Disponível em: https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0411. Acesso em: 25 ago. 2026.

PEFFERS, Ken; TUUNANEN, Tuure; ROTHENBERGER, Marcus A.; CHATTERJEE, Samir. A design science research methodology for information systems research. Journal of Management Information Systems, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2007. DOI: https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302.

PNCP. Dados abertos. Brasília, DF: Portal Nacional de Contratações Públicas, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/pncp/pt-br/acesso-a-informacao/copy_of_dados-abertos. Acesso em: 25 ago. 2026.

RIO GRANDE DO NORTE. Decreto nº 30.345, de 30 de dezembro de 2020. Dispõe sobre a estrutura organizacional da Secretaria de Estado da Saúde Pública. Natal: Governo do Estado do Rio Grande do Norte, 2020. Disponível em: https://diariooficial.rn.gov.br/dei/dorn3/documentos/00000001/20201231/708765.htm. Acesso em: 26 ago. 2026.

SOYLU, Ahmet et al. Data quality barriers for transparency in public procurement. Information, v. 13, n. 2, art. 99, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/info13020099.

TCU. Plano de contratações anual (PCA). In: Licitações e Contratos: Orientações e Jurisprudência do TCU. Brasília, DF: Tribunal de Contas da União, [s.d.]. Disponível em: https://licitacoesecontratos.tcu.gov.br/2-3-2-3-plano-de-contratacoes-anual-pca/. Acesso em: 25 ago. 2026.

TRKMAN, Peter. The critical success factors of business process management. International Journal of Information Management, v. 30, n. 2, p. 125-134, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2009.07.003.

UFRN; SESAP/RN. Ata da Reunião com o Comitê de Liderança RCL 003/2026, realizada em 17 de agosto de 2026. Natal, 2026. Documento interno.

UFRN; SESAP/RN. Relatório Parcial do Projeto DIMP SESAP: novembro de 2025 a abril de 2026 - Fase 2. Natal, 2026. Documento técnico interno.

VENABLE, John; PRIES-HEJE, Jan; BASKERVILLE, Richard. FEDS: a framework for evaluation in design science research. European Journal of Information Systems, v. 25, n. 1, p. 77-89, 2016. DOI: https://doi.org/10.1057/ejis.2014.36.

YIGITBASIOGLU, Ogan M.; VELCU, Oana. A review of dashboards in performance management: implications for design and research. International Journal of Accounting Information Systems, v. 13, n. 1, p. 41-59, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.accinf.2011.08.002.

Anexos



Figura 1 - Framework metodológico do desenvolvimento da pesquisa



Figura 2 - Fluxograma do Subprocesso: Fase de Monitoramento



Figura 3 - Diagrama de Ishikawa sobre Processo do PCA



Figura 4 - Visão executiva dashboard do PCA da SESAP/RN

CÓDIGO: ET0879

AUTOR: NATHAN VARELA SILVA

COAUTOR: UILAME UMBELINO GOMES

COAUTOR: MARCO ANTONIO MORALES TORRES

ORIENTADOR: FRANCINE ALVES DA COSTA

TÍTULO: Síntese por Coprecipitação e Caracterização Estrutural do Molibdato de Prata (Ag2MoO4) para Aplicação como Pó Precursor do Compósito W-Mo-Ag.

Resumo

A combinação de metais refratários e de transição em compósitos como o sistema Mo-Ag atende a demandas tecnológicas em contatos elétricos e dissipadores térmicos devido à sua elevada condutividade e resistência à oxidação. Contudo, a imiscibilidade entre esses metais e a baixa molhabilidade dificultam o processamento por rotas convencionais. Este trabalho aborda a síntese química do molibdato de prata (Ag2MoO4) pelo método de coprecipitação para aplicação como pó precursor na rota da metalurgia do pó. A síntese foi realizada utilizando nitrato de prata, heptamolibdato de amônia e hidróxido de amônio em meio aquoso sob agitação, seguida de lavagem e secagem a 60°. A caracterização estrutural por Difração de Raios X (DRX) confirmou a formação da fase cristalina -Ag2MoO4, apresentando picos de reflexão bem definidos e alinhados à ficha ICSD: 36187, sem a presença de fases secundárias. O método mostrou-se eficiente, reprodutível e de baixo consumo energético. A rota adotada contribui com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, destacando-se os ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) pela otimização do uso de insumos e promoção de inovação no processamento de materiais avançados.

Palavras-chave: PALAVRAS CHAVE: Molibdato de prata. Coprecipitação. Metalurgia do pó.

TITLE: Synthesis by Coprecipitation and Structural Characterization of Silver Molybdate (Ag2MoO4) for Application as a Precursor Powder for the W-Mo-Ag Composite

Abstract

The combination of refractory and transition metals in composites such as the Mo-Ag system meets technological demands in electrical contacts and heat sinks due to high conductivity and oxidation resistance. However, immiscibility and low wettability between these metals challenge conventional processing routes. This study focuses on the chemical synthesis of silver molybdate (Ag2MoO4) via the co-precipitation method for use as a precursor powder in powder metallurgy processing. Synthesis was carried out using silver nitrate, ammonium heptamolybdate, and ammonium hydroxide in an aqueous medium under stirring, followed by washing and drying at 60°. Structural characterization by X-Ray Diffraction (XRD) confirmed the formation of the crystalline -Ag2MoO4 phase with sharp, well-defined reflection peaks matching standard ICSD: 36187, without secondary phases. The method proved efficient, reproducible, and energy-efficient. Furthermore, the approach aligns with UN Sustainable Development Goals (SDGs), notably SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production) through process optimization and sustainable development of advanced materials.

Keywords: KEYWORDS: Silver molybdate. Co-precipitation. Powder metallurgy.

Introdução

INTRODUÇÃO:

Combinar propriedades de dois ou mais elementos em um único corpo é a finalidade dos compósitos modernos [1]. A combinação de metais refratários como WC, W e Mo com metais de transição, tais como Cu e Ag tem sido amplamente utilizados para produzir materiais compósitos aplicados a contatos elétricos, dissipadores de calor, bem como absorvedores micro-ondas em dispositivos microeletrônicos [2]. No contexto atual, essa ampla utilização em aplicações elétricas e eletrônicas de materiais que tem como constituintes base o cobre e a prata se deve a sua superior condutividade elétrica e térmica quando comparado a maioria dos metais puros, bem como sua boa ductilidade, facilitando sua fabricação para diversos componentes [3,4]. A prata apresenta ainda vantagem em relação ao cobre, em aplicações que necessitam de maior resistência à oxidação, no entanto, tem sua utilização ainda limitada devido ao seu alto custo [5].

Há uma grande dificuldade de obtenção dos compósitos, tungstênio-prata e molibdênio-prata utilizando os métodos tradicionais por se tratarem de sistemas imiscíveis e pela baixa molhabilidade da prata (Ag), mesmo em estado líquido, com o molibdênio(Mo) e com o tungstênio (W). Outra grande dificuldade está na diferença entre os pontos de fusão dos constituintes envolvidos na formação desse compósito, enquanto tungstênio e molibdênio, apresentam altos pontos de fusão (3422 °C) e (2620 °C), respectivamente, a prata apresenta baixo ponto de fusão (961,78 °C), [6]. ZHANG et al. [7], afirma que a obtenção de compósitos Mo-Cu pelos métodos tradicionais produz geralmente, compactos com baixa densidade, comportamento que também é alcançado quando substitui a fase cobre pela fase prata do compósito. A metalurgia do pó é uma técnica adequada para produzir compósitos com alta densidade quando pós de sistemas imiscíveis assim como Mo-Ag são preparados pela rota de Moagem de Alta Energia (MAE) e sinterizados em fase líquida. Neste caso, compósitos com microestrutura nanoestruturada são produzidos [8].

A obtenção desse tipo de material através dessa técnica, envolve a mistura dos pós, compactação e sinterização possibilitando a produção de geometrias mais complexas e composição variada [9]. Para início da produção de materiais usando a rota da metalurgia do pó é necessário que, inicialmente, os pós desses materiais sejam obtidos [2]. Há algumas formas de obtenção desses materiais, subdividindo-se em formas que envolvem processos químicos, físicos e mecânicos [2]. Este trabalho utiliza o método químico da coprecipitação para obtenção dos pós, envolvendo a precipitação simultânea de mais de um composto a partir de uma solução.

Neste trabalho, molibdato de prata foi produzido pela rota química usando o método da coprecipitação. Ao final, serão realizadas análises por difratometria de raios X para confirmação da fase formada e sua cristalinidade, posteriormente esse material será utilizado como metal precursor na rota da metalurgia do pó. O presente trabalho contribui para o ODS 9 ao utilizar uma rota química para síntese dos pós precursores da pseudo-liga. Durante a preparação, a homogeneidade dos pós obtidos promove eficiência energética na etapa subsequente de sinterização e uso racional de matérias primas, ODS 12. Por fim, as aplicações do compósito em contatos elétricos e dissipadores térmicos otimizam a eficiência de sistemas de energia renovável e mobilidade elétrica, ODS 7 e 13.

Metodologia

METODOLOGIA
Esta seção descreve os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste estudo. Os procedimentos experimentais ocorreram no laboratório de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais (LMCME) da universidade federal do Rio Grande do Norte (UFRN). A figura 1 apresenta o procedimento experimental adotado neste trabalho.

Figura 1 - Fluxograma do procedimento experimental
Fonte: Autoria Própria

Materiais Precursores

Os materiais precursores utilizados para a realização deste estudo foram Nitrato de prata, Heptamolibdato de amônia e Hidróxido de amônio, com as seguintes formulações químicas e fabricantes, respectivamente. Nitrato de prata (Ag2NO3, PLAT-LAB), Heptamolibdato de amônio ((NH4)6Mo7O244H2O, DINÂMICA) e Hidróxido de amônio (NH4OH, ISOFAR), a figura 2 abaixo ilustra esses materiais.

Figura 2 - Materiais Precursores

Fonte: Autoria Própria

Inicialmente foram realizadas as pesagens dos materiais precursores em uma balança analítica, modelo SHIMADZU ATY224R, suas massas estão descritas na tabela 1.

Tabela 1 - Massa dos Pós Precursores

Fonte: Autoria Própria

Procedimento Experimental (Procedimento de síntese)

Em seguida, os materiais foram submetidos à um procedimento de síntese, conhecido como técnica de coprecipitação. Sob agitação magnética contínua, o heptamolibdato de amônia e o nitrato de prata foram dissolvidos consecutivamente em 100 mL de água deionizada até obter-se uma solução transparente. À essa mistura, foram adicionados 6 mL de Hidróxido de amônio (NH4OH), gota a gota, sob agitação magnética constante para garantir a formação completa do precipitado de coloração amarelo-claro. Após a decantação, o precipitado foi submetido ao procedimento de filtragem e lavagem para remover possíveis íons residuais. O procedimento foi seguido de secagem em estufa a 60°. A figura 3 mostra o material obtido ao final do experimento de coprecipitação.

Figura 3 - Pó de molibdato de prata produzido por coprecipitação

Fonte: Autoria Própria

Caracterizações

Com a finalização do procedimento de síntese, os pós de molibdato de prata produzidos foram encaminhados para análise de Difração de Raios X (DRX), conforme visto na figura 4.

A figura 4 mostra os picos de difração do pó de molibdato de prata que foram obtidos pela técnica de difração de Raios-X, na qual foi obtida utilizando um difratômetro da marca Rigaku, modelo MiniFlex ll , disponibilizado pelo LMCME, localizado na UFRN. As análises foram conduzidas com os seguintes parâmetros: a faixa de varredura de 0° a 100° ,com velocidade de 3°/min e passo de 0,02°. Posteriormente, de posse do resultado, com o auxílio do software HighScore Plus foi possível a identificação das fases.

Resultados e Discussões

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A confirmação da obtenção da fase cristalina dos pós sintetizados por coprecipitação química foi realizada por meio da técnica de difratometria de raios X (DRX). A figura 4 apresenta o padrão de difração do pó sintetizado.

O resultado do DRX confirmou a formação da fase cristalina Ag2MoO4 em que a análise qualitativa do difratograma revela presença de picos bem definidos e de elevada intensidade, característicos do material, o que indica a sua formação com alto grau de

cristalinidade. Esses resultados são respaldados pela indexação dos picos principais e característicos, conforme a carta cristalográfica ICSD: 36187.

A indexação ocorreu por comparação direta dos resultados obtidos com a ficha padrão da ICSD (Inorganic Crystal Structure Database), onde observamos repetir o mesmo modelo de distribuição dos picos para o mesmo intervalo analisado. Para tanto, na análise dos resultados obtidos foi pontuado os quatro primeiros picos característicos observados no intervalo de ângulos (2) e lhes foram atribuídos os seus respectivos planos cristalinos referentes a fase do molibidato de prata.

A fase obtida neste trabalho apresentou concordância com os resultados reportados por SOUZA [10] que também sintetizou o molibdato de prata e confirmou a formação da sua estrutura no tipo -Ag2MoO4 . A posição dos perfis de difração visto na figura 5 evidência que os picos característicos observados correspondem aos ângulos e intensidades relativas obtidas pelo referido autor. A ausência de picos secundários, em ambas as sínteses, reforça a reprodutibilidade da rota de coprecipitação química e a alta pureza do precursor metálico obtido.

Figura 5 - Comparação dos resultados obtidos

Fonte: Autoria Própria

Diante dos resultados e da convergência com a literatura, conclui-se que a rota química pelo método escolhido mostrou-se amplamente eficaz e reprodutível para a obtenção do molibdato de prata. A confirmação de um material cristalino e isento de fases secundárias atesta o controle adequado aos parâmetros reacionais durante o experimento. Tais características são fundamentais para as etapas subsequentes de processamento na metalurgia do pó.

Conclusão

CONCLUSÃO

A síntese do molibdato de prata pelo método de coprecipitação demonstrou que a rota química para a formação desse composto inorgânico é eficaz tanto para promover a formação do material de interesse, de forma cristalina, quanto se mostrou um método com baixo custo energético. A metodologia empregada destacou-se por sua simplicidade operacional e curto tempo de reação quando comparado a outros métodos convencionais, garantindo um processo viável.

A análise por difração de raios X (DRX) provou ser de grande importância na verificação do material sintetizado. Os resultados dessa análise apresentaram picos de reflexão intensos e bem definidos, cujos perfis e posições encontraram concordância com a literatura consolidada e com os padrões da ficha do material. Essa correção atesta a obtenção de uma fase cristalina sem a presença de fases secundárias.

A alta pureza e a uniformidade do material obtido são requisitos fundamentais para consolidação na fase posterior da metalurgia do pó. Ademais, o desenvolvimento deste trabalho representa um passo estratégico para obtenção de material precursor, na metalurgia do pó, de alta pureza. Em consonância com os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) da ONU, em especial o ODS 9, por levar inovação e desenvolvimento de novos materiais avançados para a indústria, e ODS 12, por incentivar rotas de síntese eficientes e sustentáveis no uso de recursos.

Referências

REFERÊNCIAS

[1] ASSUNÇÃO, R. A. B. DE. INFLUÊNCIA DA MOAGEM DE ALTA ENERGIA E DO PRECURSOR HEPTAMOLIBDATO DE AMÔNIA NA DENSIDADE E MICROESTRUTURA DO COMPÓSITO Mo-27,82%vCu. [s.l: s.n.].

[2] MEDEIROS, Freud Araújo. Estudo da obtenção de um compósito Mo-28%Ag preparado por moagem de alta energia e redução de pós HMA-25%AgNO3. 2019. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

[3] O. Güler, T. Varol, Ü. Alver, A. Çanakçı, The effect of flake-like morphology on the coating properties of silver coated copper particles fabricated by electroless plating, J. Alloy. Compd. 782 (2019) 679–688

[4] T. Varol, _ I. Hacısalihog˘lu, G. Kaya, O. Güler, F. Yıldız, H.C. Aksa, S.B. Akçay, The effect of selective laser melting process on the microstructure, density, and electrical conductivity of silver-coated copper cores, J. Mater. Eng. Perform. 30 (7) (2021) 5216–5226.

[5] Luo, G., Guo, J., Hu, J., Li, P., Sun, Y., & Shen, Q. (2022). Microstructure and properties of W-Ag matrix composites by designed dual-metal-layer coated powders. Materials & Design, 219, Article 110820. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110733

[6] X.S. Huang, T. Mashimo, Nonequilibrium alloy powders and bulk alloys in WAg system prepared by mechanical alloying and shock compression, J. Alloy. Compd. 361 (2003) 118

[7] ZHANG, Di; HAN, Tielong; HOU, Chao; LI, Yurong; SONG, Xiaoyan. High-performance Mo-Cu composite fabricated by integrating electroless-plating and high-pressure sintering. Journal of Alloys and Compounds, v. 1036, 181997, 2025.

[8] Costa, F. A. D. et al. Synthesis of a nanocrystalline composite W-25wt.%Ag powder by high energy milling. p. 30-33. Abril 2008. ISSN 10.1016/j.powtec.2008.03.009.

[9] MOURA, Thiago Alves de. Estudo da obtenção de um compósito W-20%Ag a partir da decomposição e redução de pós de paratungstato de amônio e nitrato de prata preparados por moagem de alta energia e sinterizados em forno resistivo. 2020. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

[10] SOUZA, Gislayllson Dias dos Santos.Síntese, Caracterização e Estudo da Estabilidade do Molibdato de Prata (Ag_2MoO_4) e do Tungstato de Prata (Ag_2WO_4). 2017. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2017.

Anexos



Figura 1 - Fluxograma do procedimento experimental



Figura 2 - Materiais Precursores



Tabela 1 - Massa dos Pós Precursores



Figura 3 - Pó de molibdato de prata produzido por coprecipitação



Figura 4- Difração de Raios X do molibdato de prata



Figura 5 - Comparação dos resultados obtidos

CÓDIGO: ET0888

AUTOR: ALANNA KHÉSLEY LOPES DA COSTA

ORIENTADOR: MAURICIO ROBERTO BOMIO DELMONTE

TÍTULO: Influência do Revestimento Superficial com heteroestrutura de KNbO3/K4Nb6O17 no Desempenho Eletroquímico do Cátodo P2-Na2/3/Ni1/3/Mn2/3/O2 para aplicação em Baterias de Íons Sódio.

Resumo

O presente estudo demonstra a eficácia da heteroestrutura KNbO3/K4Nb6O17 como revestimento superficial para cátodos de P2-Na2/3/Ni1/3/Mn2/3/O2 em baterias de íons sódio. Para isso, foram preparadas amostras pura e com revestimento superficial em diferentes proporções (1, 3 e 5%). A análise por difração de raios X confirma que o revestimento preserva a estrutura cristalina do material hospedeiro. As medidas eletroquímicas revelam que a amostra revestida com 3% em massa apresenta o melhor desempenho eletroquímico, exibindo capacidade inicial de descarga de aproximadamente 125 mAh g^{-1}, retenção de capacidade de 98,4% após o primeiro ciclo e superior capacidade de taxa em comparação com a amostra não revestida. A espectroscopia de impedância demonstra uma redução significativa da resistência à transferência de carga na amostra com 3% de revestimento, sugerindo maior transporte de íons Na^+ e cinética eletroquímica interfacial mais rápida em comparação com a amostra não revestida. Os resultados evidenciam que o revestimento superficial com 3% da heteroestrutura KNbO3/K4Nb6O17 é uma solução promissora para otimizar o desempenho eletroquímico de cátodos de P2-Na2/3/Ni1/3/Mn2/3/O2 para baterias de íons sódio.

Palavras-chave: Baterias Íon-sódio; Revestimento; Heteroestruta

TITLE: Influence of Surface Coating with a $KNbO_3/K_4Nb_6O_{17}$ Heterostructure on the Electrochemical Performance of the P2-$Na_{2/3}Ni_{1/3}Mn_{2/3}O_2$ Cathode for Application in Sodium-Ion Batteries

Abstract

The present study demonstrates the effectiveness of the KNbO3/K4Nb6O17 heterostructure as a surface coating for P2-Na2/3/Ni1/3/Mn2/3/O2 cathodes in sodium-ion batteries. To this end, pristine and surface-coated samples with different coating

contents (1, 3, and 5%) were prepared. X-ray diffraction analysis confirms that the coating preserves the crystal structure of the host material. Electrochemical measurements reveal that the sample coated with 3% exhibits the best electrochemical performance, delivering an initial discharge capacity of approximately 125 mAh g^{-1}, a first-cycle capacity retention of 98.4%, and superior rate capability compared with the uncoated sample. Electrochemical impedance spectroscopy demonstrates a significant reduction in the charge-transfer resistance for the 3% coated sample, suggesting enhanced Na^+ transport and faster interfacial electrochemical kinetics compared with the uncoated sample. These results demonstrate that surface coating with 3% of the KNbO3/K4Nb6O17 heterostructure is a promising strategy for enhancing the electrochemical performance of P2-Na2/3/Ni1/3/Mn2/3/O2 cathodes for sodium-ion batteries.

Keywords: Sodium-ion batteries; Coating; Heterostructure

Introdução

Nas últimas décadas, o crescimento populacional, a industrialização e o avanço tecnológico têm ampliado significativamente a demanda por sistemas eficientes de armazenamento de energia, essenciais para aplicações como transporte elétrico e dispositivos eletrônicos (Kumar & Kundu, 2024). Atualmente, as baterias de íons lítio (LIBs) predominam no armazenamento eletroquímico devido à sua elevada densidade de energia e estabilidade durante os ciclos de carga e descarga (Xu et al., 2023; Khan et al., 2023). Entretanto, o aumento da produção de LIBs tem intensificado a preocupação com a disponibilidade das reservas de lítio, os custos das matérias-primas e os impactos ambientais associados à mineração (Wu et al., 2024).

Nesse contexto, as baterias de íons sódio (SIBs) têm se destacado como uma alternativa promissora às LIBs, principalmente devido à abundância e à ampla distribuição geográfica do sódio, que possibilitam menor custo e maior disponibilidade de matéria-prima (Phogat et al., 2025; Vaalma et al., 2018). O desenvolvimento desses dispositivos, contudo, depende diretamente da obtenção de materiais de eletrodo que apresentem elevada capacidade, reversibilidade e estabilidade cíclica (Wan et al., 2024).

Entre os materiais catódicos investigados, o óxido lamelar P2-$Na_{2/3}Ni_{1/3}Mn_{2/3}O_2$ apresenta características promissoras para SIBs. Sua estrutura P2 é constituída por camadas de octaedros MeO_6, nas quais os íons Na^+ ocupam sítios prismáticos, favorecendo sua difusão e proporcionando elevado potencial de operação, capacidade de descarga e estabilidade eletroquímica (Zhang et al., 2019; Li et al., 2017; Yabuuchi et al., 2012). Entretanto, durante os ciclos de carga e descarga, podem ocorrer transições estruturais irreversíveis, ordenamento de vacâncias de sódio e degradação da interface eletrodo-eletrólito, comprometendo seu desempenho. O revestimento superficial é uma estratégia eficaz para minimizar esses efeitos, retardando a degradação do material ativo e favorecendo a cinética eletroquímica (Wei et al., 2024; Bi et al., 2025).

Nesse sentido, heteroestruturas podem apresentar propriedades superiores às de suas fases individuais devido a efeitos sinérgicos na interface (Qin et al., 2024). O $KNbO_3$, com estrutura perovskita, apresenta propriedades dielétricas e ferroelétricas associadas à transferência de carga (Wang et al., 2020), enquanto o $K_4Nb_6O_{17}$ possui estrutura lamelar constituída por camadas de NbO_6 e espaçamento interlamelar favorável à difusão iônica

(Bizeto et al., 2006). A combinação dessas fases em uma heteroestrutura $KNbO_3/K_4Nb_6O_{17}$ pode, portanto, contribuir para reduzir a resistência à transferência de carga, estabilizar a interface eletrodo-eletrólito e favorecer a intercalação/desintercalação de Na^+.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo investigar a influência do revestimento superficial com a heteroestrutura $KNbO_3/K_4Nb_6O_{17}$ sobre o desempenho eletroquímico do cátodo P2-$Na_{2/3}Ni_{1/3}Mn_{2/3}O_2$ para aplicação em SIBs. Foram avaliadas amostras com 1, 3 e 5% de revestimento, buscando correlacionar a presença da heteroestrutura com as características morfológicas, a resistência à transferência de carga e o desempenho eletroquímico do material catódico.

Metodologia

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Síntese de NMO

O P2-Na2/3/Ni1/3/Mn2/3/O2 (NMO) foi obtido via rota de síntese sol-gel, na qual baseou-se no uso de ácido cítrico (Synth, 99%) como agente quelante, empregando-se uma razão molar ácido cítrico:metais de 3:2. Dessa maneira, quantidades estequiométricas de $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (Sigma-Aldrich, 99%) e $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (Alfa Aesar, 98%) foram dissolvidas em 100 mL de solução contendo ácido cítrico (solução X). Posteriormente, acetato de sódio com 5% de excesso (Vetec, 99%) foi dissolvido em 50 mL de água destilada (solução Y). Com isso, a solução Y foi cuidadosamente gotejada na Solução X até que obtivesse a completa homogeneização. A solução resultante foi evaporada a uma temperatura de 120 °C, e o gel obtido foi calcinado a 450 °C por um período de 3 horas. Após esta etapa, os materiais obtidos foram prensados de forma uniaxial, apresentando uma geometria compacta na forma de pastilhas que, posteriormente foram recozidas em um cadinho de alumina a 900 °C, com taxa de aquecimento de 2 °C min^{-1}, durante 12 horas.

2.2 Síntese de KNbO3/K4Nb6O17

A heteroestrutura KNbO3/K4Nb6O17 foi obtida pelo método de síntese Pechini. Para tanto, utilizou-se 17,7 g de ácido cítrico (Synth, 98%) o qual atuou como agente quelante e 11,8 g de etilenoglicol (Synth) como agente polimerizante. Os agentes precursores da heteroestrutura foram 5,97 g de oxalato amoniacal de nióbio ($NH_4H_2NbO(C_2O_4)_2 \cdot 3H_2O$) e 1,29 g de nitrato de sódio (Synth, 98%). Por fim, a viscosidade da resina foi ajustada para 22 cP, utilizando um viscosímetro Brookfield, e submetida a um teste gravimétrico para determinar a quantidade da heteroestrutura presente por mililitro de resina.

2.3 Revestimento

Em uma segunda etapa, 500 mg de NMO foram revestidos por uma rota química envolvendo a adição de 1%, 3% e 5% de resina de KNbO3/K4Nb6O17 em 50 mL de

etanol (Synth, 99% v/v). A dispersão foi realizada utilizando uma sonda ultrassônica pulsada (Ultronique), imersa na solução precursora por 30 minutos. As condições de ultrassonicação foram: potência de 750 W, frequência de 20 kHz e duração de pulso de 10 s. Após este processo, o material obtido foi seco a 120 °C durante uma noite, macerado em almofariz de ágata e submetido a tratamento térmico de recozimento a uma temperatura de 800 °C, com taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1}, por 2 horas. Essas amostras foram denominadas NMO@Nb1, NMO@Nb3 e NMO@Nb5, correspondendo a 1%, 3% e 5% de revestimento de KNbO3/K4Nb6O17, respectivamente.

2.5 Caracterização

2.5.1 Morfológica e Espectral

A difração de raios X (DRX) foi empregada para investigar a pureza de fase e o grau de cristalinidade das amostras.Para isso, foi utilizado um difratômetro Shimadzu XDR-6000 equipado com radiação Cu K e monocromador de grafite. Os difratogramas foram obtidos na faixa de 10 a 90° em ângulos de 2θ, com velocidade de varredura de 1°/min. As micrografias foram obtidas através de um microscópio JEOL JSM-788F Prime.

2.5.2 Medições Eletroquímicas

Células de sódio do tipo Swagelok foram preparadas utilizando eletrodos de trabalho de aproximadamente 3 mg/cm^2, constituídos por 70% de material ativo, 20% de negro de acetileno e 10% de fluoreto de polivinilideno (PVDF). Os componentes foram dispersos em N-metil-2-pirrolidona (NMP, Emplura, 99,5%) e mantidos sob agitação por no mínimo 2 horas, até a obtenção de uma suspensão homogênea. Em seguida, a mistura foi depositada sobre discos de alumínio com 9 mm de diâmetro e submetida à secagem a vácuo a 120 °C durante várias horas. Como contraeletrodo, utilizou-se sódio metálico (Panreac, 99,8%). O eletrólito empregado foi constituído de uma solução de 1 M de $NaPF_6$ (Strem, >99%) dissolvido em carbonato de propileno (PC) (Sigma-Aldrich, 99,7%), contendo 2% em massa de carbonato de fluoretileno (FEC) (Sigma-Aldrich, 99%). Essa solução foi utilizada para umedecer separadores de fibra de vidro GF/A (Whatman). A montagem das células foi realizada em uma glovebox MBraun sob atmosfera de argônio, com monitoramento contínuo das concentrações residuais de oxigênio (O2) e vapor d'água (H2O). Os testes eletroquímicos foram conduzidos em um sistema multicanal Biologic, operando nas funções de galvanostato e potenciostato. O desempenho em diferentes taxas de carga e descarga (capacidade de taxa) foi investigado por meio de ciclos galvanostáticos variando de C/10 a 5C, na faixa de potencial de 2,0 a 4,3 V em relação ao eletrodo Na^+/Na. A resistência interna das células foi analisada por Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS) em um equipamento Biologic SP-150, a partir da obtenção de diagramas de Nyquist. Para isso, aplicou-se um sinal senoidal de 5 mV em torno da tensão de circuito aberto, cobrindo uma faixa de frequência entre 100 kHz e 2 mHz. Antes da realização dessas medidas, as células previamente cicladas a C/10 permaneceram em repouso por um período mínimo de 12 horas, permitindo o estabelecimento de um estado de quase equilíbrio.

Resultados e Discussões

3. RESULTADOS

3.1 DRX

A Figura 1 apresenta os padrões de difração de raios X das amostras de NMO puro e das amostras revestidas com 1, 3 e 5% da heteroestrutura KNbO3/K4Nb6O17. Os difratogramas de todas as amostras apresentam um conjunto de reflexões estreitas, com picos bem definidos, evidenciando a elevada cristalinidade dos materiais obtidos. Além disso, os principais picos de difração estão indexados ao grupo espacial P63/mmc associado ao sistema hexagonal da estrutura do NMO. Essa estrutura é composta por estratos intercalados de octaedros (Mn, Ni)O6 e prismas NaO6, que compartilham faces e, por sua vez, favorecem a difusão dos íons de sódio ao criarem um espaço entre as camadas pelos quais os íons podem difundir-se (Bomio et al., 2023). Nota-se, ainda, que o aumento do teor de revestimento da heteroestrutura no substrato não promove deslocamentos significativos na posição dos picos de difração em relação ao difratograma do NMO, indicando que não houve incorporação dos elementos do revestimento à rede cristalina.

A Figura 2 apresenta o difratograma de raios X da heteroestrutura $KNbO_3/K_4Nb_6O_{17}$ obtida após tratamento térmico a 800 °C. A indexação dos picos evidencia a coexistência de duas fases cristalinas distintas. A fase perovskita $KNbO_3$, é identificada pelos picos marcados com "*", e a fase lamelar $K_4Nb_6O_{17}$, representada pelos símbolos "#". A presença simultânea dos picos característicos dessas duas estruturas cristalinas confirmam a formação da heteroestrutura. Os picos de maior intensidade localizados próximos de 22°, 29°, 45° e 56° (2θ) são atribuídos a fase $KNbO_3$, enquanto reflexões características da fase $K_4Nb_6O_{17}$ são identificadas, em aproximadamente 11°, 20°, 24°, 36° e 48° (2θ). A coexistência das reflexões demonstra que ambas as fases foram preservadas durante o processo de síntese, indicando que não ocorreu a formação de uma solução sólida, mas sim de uma heteroestrutura constituída por dois materiais cristalinos distintos em contato interfacial.

3.2 Capacidade de Taxa

A Figura 3 apresenta o gráfico da capacidade de taxa das semicélulas de sódio estudadas, as quais foram testadas ciclando em taxas variadas de C/10 a 5C e, posteriormente a 1C para a verificação da retenção de capacidade após a ciclagem em altas taxas. Nesse contexto, a capacidade inicial de descarga da amostra sem a camada de revestimento (NMO@KNb0) foi de aproximadamente 110 mAh.g-1, representando cerca de 63% de sua capacidade teórica (174 mAh.g-1) (Liu et al., 2016; Lavela et al., 2024). Apesar disso, durante os primeiros ciclos, a amostra que apresentou a maior capacidade específica foi a amostra revestida com 3% da heteroestrutura (125 mAh.g-1). Após o primeiro ciclo, houve uma melhora na retenção da capacidade com o aumento no teor de revestimento, onde a amostra pura apresentou uma retenção em relação a capacidade inicial de aproximadamente 86%, enquanto a amostra revestida (NMO@KNb3) manteve a capacidade no valor de 123 mAh.g-1, correspondendo a uma retenção de 98,4% em relação a sua capacidade inicial. Ao elevar a taxa C, as amostras NMO@KNb3 e NMO@KNb5 apresentaram os valores de capacidade mais altos em 5C, de 46,4 e 43,7 mAh.g-1, respectivamente, no entanto, valores mais baixos de 38,4 e 28,6 foram observados para as amostras de NMO@KNb1 e NMO@KNb0, respectivamente. Para os ciclos posteriores a taxa de 1C, os resultados evidenciaram que a amostra modificada com

revestimento superficial de 3% da heteroestrutura de KNbO3/K4Nb6O17, apresentou a maior capacidade de descarga, destacando a sua melhor reversibilidade frente às demais amostras, superando a amostra de NMO@KNb0.

3.3 Espectroscopia de Impedância

A espectroscopia de impedância eletroquímica é uma técnica amplamente utilizada na caracterização de sistemas de armazenamento de energia, o qual fornece informações sobre a resposta cinética dos materiais de eletrodo (Lazanas & Prodromidis, 2023). Além disso, sabe-se que camadas de revestimento superficiais, promovem alterações no desempenho eletroquímico dos materiais. Nessa perspectiva, espectros de impedância foram obtidos com o intuito de avaliar a influência da resistência na interface eletrodo-eletrólito. A figura 4a. mostra os diagramas de Nyquist obtidos após o primeiro ciclo a taxa de C/10. Nas regiões de altas e médias frequências, são observados dois semicírculos associados aos fenômenos capacitivos e resistivos que ocorrem na camada superficial, além da reação de transferência de cargas na região de interface eletrodo-eletrólito. A resistência da célula associada a camada superficial (Rsl), a resistência a transferência de cargas na interface do eletrodo (Rct) e a resistência ôhmica do eletrólito (Rel), foram calculadas (Tabela 1) através do ajuste dos diagramas ao circuito elétrico equivalente apresentado na Figura 5. Os valores ôhmicos de Rel mostraram-se desprezíveis com relação às demais resistências, evidenciando mínima interferência do eletrólito no desempenho eletroquímico das células. Com relação aos valores de Rsl, destaca-se a amostra NMO@KNb5, a qual apresentou o menor valor de impedância, indicando que o aumento no teor de revestimento favoreceu a formação de uma camada superficial mais estável e menos resistiva. Apesar disso, a amostra de maior relevância frente a resistência à transferência de carga foi a amostra de NMO@KNb3, cujo valor de Rct mostrou-se significativamente menor do que às demais células. Esse comportamento sugere que, o teor de 3% de revestimento melhorou a cinética das reações eletroquímicas, favorecendo o processo de intercalação e desintercalação dos íons Na+. Tal resultado, corrobora com os demais dados observados na Figura 3, onde a amostra NMO@KNb3 apresentou o melhor desempenho na capacidade de taxa.

Conclusão

Este trabalho demonstra que o revestimento superficial com a heteroestrutura KNbO3/K4Nb6O17 melhora de forma significativa o desempenho eletroquímico do cátodo P2-Na2/3/Ni1/3/Mn2/3/O2, evidenciado pelas medições eletroquímicas. Os resultados de difração de raios X mostraram que não houve incorporação dos elementos do revestimento na estrutura cristalina do material ativo, preservando a sua estrutura. Através das medições eletroquímicas constatou-se que o revestimento melhorou de forma significativa o desempenho do material catódico, sendo a composição contendo 3% de heteroestrutura (NMO@KNb3) a que apresentou os melhores resultados. O NMO@KNb3 apresentou maior capacidade específica inicial, elevada retenção de capacidade durante a ciclagem e melhor desempenho em altas taxas de carga e descarga quando comparada ao material não revestido. Os resultados de espectroscopia de impedância eletroquímica corroboram esse comportamento, evidenciando a redução expressiva da resistência à transferência de carga (Rct), indicando que o revestimento

favoreceu a cinética das reações eletroquímicas e o transporte de íons Na^+ na interface eletrodo-eletrólito. Assim, os resultados obtidos demonstram que o revestimento superficial com a heteroestrutura constitui uma estratégia promissora para o aprimoramento do cátodoP2-Na2/3/Ni1/3/Mn2/3/O2 destinados às baterias de íons sódio.

Referências

BI, Hongwei et al. Tailoring cathode interfaces in sodium-ion batteries: advanced coating strategies and electrochemical interface regulation. Advanced Functional Materials, v. 35, n. 49, p. e07781, 2025.

BIZETO, Marcos A. et al. Structural aspects related to the ion exchange process in layered niobate $K_4Nb_6O_{17}$. Química Nova, v. 29, p. 1215-1220, 2006.

BOMIO, M. R. D. et al. Optimized Synthesis of $Na_{2/3}Ni_{1/3}Mn_{2/3}O_2$ as Cathode for Sodium-Ion Batteries by Rapid Microwave Calcination. Ceramics International, 2023.

KUMAR, Kundan; KUNDU, Rajen. Empowering energy storage technology: recent breakthroughs and advancement in sodium-ion batteries. ACS Applied Energy Materials, v. 7, n. 9, p. 3523-3539, 2024.

LAVELA, Sergio et al. Improving the performance of the layered nickel manganese oxide cathode of sodium-ion batteries by direct coating with sodium niobium oxide. ACS Applied Materials & Interfaces, v. 16, n. 42, p. 56975-56986, 2024.

LAZANAS, Alexandros Ch.; PRODROMIDIS, Mamas I. Electrochemical impedance spectroscopy─a tutorial. ACS Measurement Science Au, v. 3, n. 3, p. 162-193, 2023.

LI, Zheng-Yao et al. Zr-doped P2-$Na_{0.75}Mn_{0.55}Ni_{0.25}Co_{0.05}Fe_{0.10}Zr_{0.05}O_2$ as high-rate performance cathode material for sodium ion batteries. Electrochimica Acta, v. 223, p. 92-99, 2017.

LIU, Yihang; FANG, Xin; ZHANG, Anyi; SHEN, Chenfei; LIU, Qingzhou; ENAYA, Hani A.; ZHOU, Chongwu. Layered P2-$Na_{2/3}[Ni_{1/3}Mn_{2/3}]O_2$ as high-voltage cathode for sodium-ion batteries: the capacity decay mechanism and Al_2O_3 surface modification. Nano Energy, v. 27, p. 27-34, 2016. DOI: 10.1016/j.nanoen.2016.06.026.

PHOGAT, Peeyush et al. Advancements and challenges in sodium-ion batteries: A comprehensive review of materials, mechanisms, and future directions for sustainable energy storage. Journal of Alloys and Compounds, v. 1020, p. 179544, 2025.

QIN, Tingting et al. Heterointerfaces: unlocking superior capacity and rapid mass transfer dynamics in energy storage electrodes. Advanced Materials, v. 36, n. 32, p. 2402644, 2024.

VAALMA, Christoph et al. A cost and resource analysis of sodium-ion batteries. Nature Reviews Materials, v. 3, n. 4, p. 18013, 2018.

WAN, Xiaoyuan et al. Cathode modification of sodium-ion batteries for improved energy density: a review. Advanced Sustainable Systems, v. 8, n. 12, p. 2400229, 2024.

WANG, Dawei et al. Crystal structure, phase transitions and photoferroelectric properties of $KNbO_3$-based lead-free ferroelectric ceramics: a brief review. Frontiers in Materials, v. 7, p. 91, 2020.

WEI, Xiang et al. An overview of the modification strategies for P2-$Na_{2/3}Ni_{1/3}Mn_{2/3}O_2$ cathode for sodium ion batteries. Sustainable Materials and Technologies, v. 41, p. e01059, 2024.

WU, Yujun et al. Recent progress in sodium-ion batteries: advanced materials, reaction mechanisms and energy applications. Electrochemical Energy Reviews, v. 7, n. 1, p. 17, 2024.

XU, Jingjing et al. High-energy lithium-ion batteries: recent progress and a promising future in applications. Energy & Environmental Materials, v. 6, n. 5, p. e12450, 2023.

YABUUCHI, Naoaki et al. P2-type $Na_x[Fe_{1/2}Mn_{1/2}]O_2$ made from earth-abundant elements for rechargeable Na batteries. Nature Materials, v. 11, n. 6, p. 512-517, 2012.

ZHANG, Jiaolong et al. Comprehensive review of P2-type $Na_{2/3}Ni_{1/3}Mn_{2/3}O_2$, a potential cathode for practical application of Na-ion batteries. ACS Applied Materials & Interfaces, v. 11, n. 25, p. 22051-22066, 2019.

Anexos



Figura 1 - Padrões de difração de raios X das amostras de NMO puro (curva preta) e do NMO revestido com 1%, 3% e 5% da heteroestrutura KNbO3/K4Nb6O17 , correspondentes às curvas vermelha, azul e verde, respectivamente.



Figura 2 - Difração de raios X da heteroestrutura KNbO3/K4Nb6O17



Figura 3 - Capacidade de taxa de semicélulas de sódio ciclando entre 2,0 e 4,3 V em variadas taxas entre C/10 a 5C e, logo após, 1C.



Figura 4 - (a) Gráficos de Nyquist das amostras estudadas, registrados após o primeiro ciclo a C/10. (b) Gráficos de Nyquist registrados após 100 ciclos a 1C.



Figura 5 - Circuito equivalente utilizado para ajustar os espectros de impedância das amostras pura e revestidas após o primeiro ciclo em C/10.



Tabela 1 -Valores de resistência dos espectros de impedância de eletrodos de P2-Na2/3/Ni1/3/Mn2/3/O2 revestidos com KNbO3/K4Nb6O17 após 1 ciclo a C/10.

CÓDIGO: ET0894

AUTOR: DANILO CARLOS DE SOUZA

COAUTOR: JOHNNY NEWTON DE SOUZA

COAUTOR: JOAO FERNANDES DE SOUSA

COAUTOR: PAULA FABIANE PINHEIRO DO NASCIMENTO

COAUTOR: FRANCISCO PAULINO DA SILVA

COAUTOR: SOPHIA MARTINS PEREIRA

ORIENTADOR: EDUARDO LINS DE BARROS NETO

TÍTULO: Biocarvões Sustentáveis de Biomassa Residual: Aplicação na Adsorção de Azul de Metileno

Resumo

A valorização de resíduos sólidos provenientes da conversão termoquímica da biomassa constitui uma estratégia promissora para o desenvolvimento de materiais sustentáveis. Este trabalho avaliou o biocarvão obtido pela pirólise do capim-elefante a 450 °C e tratado com NaOH como bioadsorvente para a remoção do azul de metileno (AM) em solução aquosa. O material foi lavado em extrator Soxhlet com etanol, tratado com NaOH 1 mol L^{-1}, lavado até pH neutro e seco a 105 °C por 24 h. As análises de DRX e MEV evidenciaram a manutenção da estrutura predominantemente amorfa e uma superfície rugosa e heterogênea, com cavidades e espaços interpartículas. Os ensaios de adsorção avaliaram diferentes concentrações e temperaturas, sendo a concentração residual determinada por espectrofotometria UV-Vis. O biocarvão tratado com NaOH apresentou aproximadamente 100% de remoção do corante, demonstrando a eficiência do tratamento alcalino. A cinética apresentou melhor ajuste ao modelo de pseudo-segunda ordem, enquanto o equilíbrio foi descrito pelo modelo de Langmuir, com capacidade máxima de adsorção de 140,85 mg g^{-1}. Os parâmetros termodinâmicos indicaram um processo espontâneo e endotérmico. Os resultados demonstram o potencial do biocarvão de capim-elefante tratado com NaOH para a remoção de contaminantes orgânicos, contribuindo para a valorização de resíduos de biomassa e o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Biocarvão; Capim-elefante; Azul de metileno; Adsorção; Bioadsorvente.

TITLE: Sustainable Biochars from Residual Biomass: Application in Methylene Blue Adsorption

Abstract

The valorization of solid residues derived from the thermochemical conversion of biomass represents a promising strategy for the development of sustainable materials. This study evaluated biochar obtained from the pyrolysis of elephant grass at 450 °C—subsequently treated with NaOH—as a bioadsorbent for the removal of methylene blue (MB) from aqueous solution. The material was washed with ethanol in a Soxhlet extractor, treated with 1 mol L^{-1} NaOH, washed until neutral pH was reached, and dried at 105 °C for 24 hours. XRD and SEM analyses revealed the preservation of a predominantly amorphous structure and a rough, heterogeneous surface featuring cavities and interparticle spaces. Adsorption assays evaluated various concentrations and temperatures, with residual concentrations determined via UV-Vis spectrophotometry. The NaOH-treated biochar achieved approximately 100% dye removal, demonstrating the effectiveness of the alkaline treatment. Kinetic data showed the best fit to the pseudo-second-order model, while equilibrium data were best described by the Langmuir model, yielding a maximum adsorption capacity of 140.85 mg g^{-1}. Thermodynamic parameters indicated a spontaneous, endothermic process. These results demonstrate the potential of NaOH-treated elephant grass biochar for removing organic contaminants, thereby contributing to biomass waste valorization and the development of sustainable wastewater treatment technologies.

Keywords: Biochar; Elephant grass; Methylene blue; Adsorption; Bioadsorbent.

Introdução

A contaminação dos recursos hídricos por resíduos industriais representa um desafio ambiental crítico. Dentre as várias fontes de poluição, a indústria têxtil se destaca pela geração de efluentes líquidos de alta complexidade, carregados com uma diversidade de compostos químicos, incluindo pigmentos sintéticos. O corante azul de metileno é um exemplo emblemático; sua estrutura molecular complexa, projetada para garantir a durabilidade e fixação em tecidos, também confere uma alta recalcitrância ambiental[1]. Essa estabilidade química o torna resistente aos processos de degradação biológica e a muitas abordagens de tratamento convencionais. A persistência de tais corantes no ambiente aquático desencadeia uma série de impactos ecológicos adversos. Mesmo em concentrações mínimas, sua presença altera drasticamente a cor dos corpos d'água, o que reduz a penetração da luz solar e, consequentemente, inibe a atividade fotossintética de plantas e microrganismos aquáticos, afetando a base da cadeia alimentar. Adicionalmente, a potencial toxicidade desses compostos representa uma ameaça

contínua à biota local e, em última instância, à saúde humana, tornando a remediação desses efluentes uma prioridade inadiável. O tratamento desses efluentes representa um obstáculo significativo, pois as tecnologias correntes se mostram ineficazes. Os tratamentos biológicos convencionais são pouco eficazes contra essas moléculas não biodegradáveis, enquanto abordagens físico-químicas, embora mais efetivas, podem envolver custos operacionais elevados e a geração de subprodutos ou lodos que demandam um descarte controlado. Diante disso, a adsorção surge como uma alternativa promissora, especialmente quando se empregam materiais de baixo custo que promovem a valorização de resíduos agrícolas e industriais, alinhando-se aos princípios da economia circular[5,6].

Nesse contexto, o biochar, um material carbonáceo obtido por meio da pirólise de biomassa em condições limitadas de oxigênio, tem despertado crescente interesse como adsorvente[5]. Sua estrutura intrinsecamente porosa, elevada área superficial e potencial para modificações químicas ou físicas conferem características favoráveis à remoção de poluentes em meio aquoso[6]. Com base nessas propriedades, o presente trabalho foi direcionado ao processo de adsorção de biocarvão a partir da avaliação de seu desempenho adsortivo. Foi atribuída especial atenção ao tratamento químico pós-pirólise, etapa importante para a purificação e ativação do material, visando à maximização de sua capacidade adsortiva. O estudo também buscou investigar de forma sistemática a influência de parâmetros operacionais, como o pH e o tempo de contato, com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica do uso do biocarvão como bioadsorvente de baixo custo e elevada eficiência na remoção de azul de metileno. Dessa forma, a pesquisa procura oferecer subsídios para aplicações futuras no tratamento de efluentes têxteis reais.

Metodologia

Foi utilizado biocarvão de capim-elefante, previamente obtido por pirólise convencional. Inicialmente, o material foi submetido a pré-tratamento em extrator Soxhlet, utilizando etanol, para remoção de frações oleosas residuais presentes nos poros. Em seguida, realizou-se a ativação química com solução de NaOH 1 mol L^{-1}, sob agitação magnética. Após o tratamento, o material foi lavado com água destilada até atingir pH neutro e seco em estufa a 100 °C por 24 h. Para avaliar as alterações promovidas pelo tratamento pós-pirólise, foram realizadas análises comparativas dos biocarvões in natura, após lavagem e após ativação química. A estrutura cristalina dos materiais foi caracterizada por difração de raios X (DRX), utilizando radiação Cu Kα e varredura na faixa de 5–120° (2θ). A morfologia superficial foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando microscópio Hitachi Tabletop Microscope TM-3000. O biocarvão tratado foi posteriormente avaliado como bioadsorvente para remoção do corante azul de metileno (AM) em solução aquosa. Os ensaios foram conduzidos em sistema de batelada, avaliando-se diferentes condições operacionais. Para a determinação das isotermas de adsorção, foram utilizadas concentrações iniciais de AM de 50, 100 e 150 ppm nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C. A cinética de adsorção foi avaliada em tempos de contato entre 10 e 120 min, enquanto o efeito da dosagem do bioadsorvente foi investigado na faixa de 10–100 mg. Também foram determinados os parâmetros termodinâmicos do processo. Ao final de cada ensaio, as amostras foram submetidas à filtração a vácuo, e a

concentração residual de AM no filtrado foi determinada por espectrofotometria UV-Visível, utilizando equipamento Varian Cary 50 e comprimento de onda de 620 nm. Os resultados de caracterização e adsorção foram utilizados para avaliar a influência do tratamento químico sobre as propriedades estruturais, morfológicas e o desempenho adsortivo do biocarvão.

Resultados e Discussões

Caracterização física (DRX e MEV)

As análises de DRX e MEV evidenciaram modificações estruturais e morfológicas no biocarvão após a pirólise e o tratamento alcalino com NaOH. A DRX indicou a perda da organização cristalina característica da celulose e a permanência de reflexões cristalinas residuais, sem alterações expressivas na estrutura remanescente após o tratamento.

As micrografias de MEV, por sua vez, mostraram superfície mais rugosa e heterogênea, com maior presença de cavidades e estruturas porosas após a ativação. Esses resultados indicam que o tratamento com NaOH promoveu principalmente a limpeza e modificação da superfície, favorecendo o desenvolvimento da porosidade e a disponibilidade de sítios ativos, o que contribuiu para o potencial adsortivo do biocarvão.

Eficiência do tratamento alcalino

Sob as condições experimentais avaliadas (massa do bioadsorvente: 50 mg; temperatura: 30° C; rotação: 150 rpm; tempo de contato: 120 min, concentração da solução: 50 ppm, pH 5,5), observou-se diferença expressiva na eficiência de remoção entre os materiais (Figura 3). O carvão tratado com NaOH apresentou o melhor desempenho, com aproximadamente 98% de remoção, seguido pela biomassa in natura, com cerca de 70%, enquanto o carvão bruto apresentou baixa eficiência, entre 15 e 20%. Esses resultados demonstram que o tratamento alcalino promoveu um aumento significativo da capacidade adsortiva do biocarvão, possivelmente associado à modificação da superfície e à maior disponibilidade de sítios ativos, tornando o material tratado mais eficiente para a remoção do corante nas condições avaliadas.

Modelo cinético

Os dados experimentais de adsorção foram ajustados aos modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, Elovich e difusão intrapartícula, para concentrações iniciais de 50, 100 e 150 ppm. Entre os modelos avaliados, a pseudo-segunda ordem apresentou o melhor ajuste em todas as concentrações, com valores de R^2 entre 0,98 e 0,99 e boa concordância entre as capacidades de adsorção calculadas e experimentais. Os valores de qe,calc variaram de 49,99 a 106,47 mg g^{-1}, enquanto os valores experimentais foram de 50,00 a 102,04 mg g^{-1}. Os modelos de pseudo-primeira ordem, Elovich e difusão intrapartícula apresentaram ajustes inferiores, com R^2 variando de 0,7045 a 0,9783. Os resultados indicam que a cinética do processo é mais adequadamente descrita pelo modelo

de pseudo-segunda ordem, sugerindo a predominância de interações entre o adsorvato e os sítios ativos do bioadsorvente.

Estudo das isotermas de adsorção

A análise das isotermas de adsorção foi realizada a partir da relação entre a capacidade de adsorção no equilíbrio (qe) e a concentração de equilíbrio (Ce), nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C. As curvas apresentaram perfil côncavo em relação ao eixo de concentração, característico de uma isoterma do tipo 1, classificada como favorável. Esse comportamento indica elevada afinidade entre o bioadsorvente e o azul de metileno, especialmente nas baixas concentrações de equilíbrio, nas quais ocorre rápida ocupação dos sítios ativos disponíveis. A tendência de estabilização de qe com o aumento de Ce está associada à progressiva ocupação dos sítios de adsorção, característica de sistemas nos quais a superfície apresenta número limitado de sítios energeticamente favoráveis e pode ocorrer formação de uma camada adsorvida. Assim, o comportamento observado evidencia a alta eficiência e o potencial do biocarvão tratado para a remoção do azul de metileno, inclusive em soluções de baixa concentração.

Estudos dos Modelos de Isotermas

O comportamento favorável observado nas isotermas é corroborado pelo modelo de Langmuir, que apresentou excelente ajuste aos dados experimentais, com $R^2 = 0,99$ para as três temperaturas avaliadas. A capacidade máxima de adsorção (qmax) variou de 136,99 a 140,85 ppm, indicando elevada capacidade do biocarvão tratado para retenção do azul de metileno. Os valores do fator de separação (RL), entre 0,0014 e 0,0046, situaram-se entre 0 e 1, confirmando que a adsorção é favorável. O aumento do parâmetro b, de 4,73 para 7,20, com a elevação da temperatura, também indica maior afinidade entre o adsorbato e os sítios de adsorção. Esses resultados reforçam o caráter favorável da isoterma e a adequação do modelo de Langmuir à descrição do equilíbrio de adsorção.

Parâmetros Termodinâmicos

A avaliação termodinâmica do processo de adsorção foi realizada nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C, a partir dos parâmetros de energia livre de Gibbs (ΔG), entalpia (ΔH) e entropia (ΔS). Os valores de ΔG foram negativos em todas as temperaturas, variando de −21,04 a −22,43 kJ mol^{-1}, indicando que o processo de adsorção é espontâneo e termodinamicamente favorável. O valor positivo de ΔH=0,0171 kJ mol^{-1} caracteriza o processo como endotérmico, indicando favorecimento da adsorção com o aumento da temperatura. A ΔS positiva de 0,0695 kJ mol^{-1} K^{-1} sugere aumento da desordem na interface sólido–solução durante o processo de adsorção. Dessa forma, os parâmetros termodinâmicos confirmam a viabilidade e espontaneidade do processo, com comportamento endotérmico e favorecimento da adsorção em temperaturas mais elevadas.

Conclusão

O biocarvão de capim-elefante tratado com NaOH demonstrou ser um adsorvente altamente eficiente e sustentável na remoção do corante azul de metileno, alcançando uma taxa de remoção de aproximadamente 100%. As análises de DRX e MEV confirmaram que o tratamento alcalino desobstruiu e criou novos poros na superfície do material. O processo adsortivo seguiu o modelo cinético de pseudo-segunda ordem e a isoterma de Langmuir, indicando uma adsorção em monocamada por quimiossorção, com capacidade máxima de 140,85 mg/g. A análise termodinâmica atestou que o processo é espontâneo (G<0) e endotérmico (H>0). Assim, o bioadsorvente se Δ Δ consolida como uma solução viável e de baixo custo para o tratamento de efluentes contendo corantes.

Referências

[1] Hameed, B. H.; Din, A. T. M.; Ahmad, A. L. Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies. Journal of Hazardous Materials, v. 141, n. 3, p. 819-825, 2007.

[2] Ho, Y. S.; McKay, G. Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry, v. 34, n. 5, p. 451-465, 1999.

[3] Langmuir, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Journal of the American Chemical Society, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, 1918.

[4] Freundlich, H. M. F. Over the adsorption in solution. Journal of Physical Chemistry, v. 57, p. 385-470, 1906.

[5] Ahmad, M.; Rajapaksha, A. U.; Lim, J. E.; Zhang, M.; Bolan, N.; Mohan, D.; Vithanage, M.; Ok, Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. Chemosphere, v. 99, p. 19-33, 2014.

[6] Tan, X.; Liu, Y.; Zeng, G.; Wang, X.; Hu, X.; Gu, Y.; Yang, Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. Chemosphere, v. 125, p. 70-85, 2015.

Anexos



Figura 1 - Difratograma do biocarvão (a) e Micrografias da biomassa capim elefante (b) e do carvão tratado (c).



Figura 2 - Remoção do corante na biomassa e nos biocarvões antes e após tratamento alcalino.



Tabela 1 - Parâmetros cinéticos de adsorção ajustados aos quatro modelos.



Figura 2 - Isoterma de adsorção em diferentes temperaturas (30, 40 e 50 °C).



Tabela 2 - Parâmetros das isotermas de adsorção ajustados aos modelos de Langmuir nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C.



Tabela 3 - Parâmetros termodinâmicos para o processo de adsorção nas temperaturas de 303 K, 313 K e 323 K.

CÓDIGO: ET0911

AUTOR: RENAN DA SILVA GADELHA

ORIENTADOR: GABRIEL IVAN MEDINA TAPIA

TÍTULO: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE JATOS DE VENTO NOTURNOS NO DESEMPENHO DE PARQUES EÓLICOS

Resumo

O Brasil, com seu vasto potencial de energia eólica concentrado principalmente na região Nordeste, desempenha um papel estratégico na transição energética global rumo a uma maior utilização de fontes renováveis. No entanto, a eficiência da geração de energia eólica é fortemente influenciada pela variabilidade sazonal e pela alternância entre as condições atmosféricas diurnas e noturnas, que afetam o comportamento dos ventos e a disponibilidade do recurso eólico.Nesse contexto, o principal objetivo deste estudo é determinar a relação quantitativa entre as características climatológicas dos jatos de baixos níveis noturnos e o potencial de energia eólica ao longo da costa do Rio Grande do Norte, Brasil. A metodologia combina dados de reanálise atmosférica do sistema ERA5, do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), incluindo variáveis de superfície e de múltiplos níveis de pressão, a fim de investigar a variabilidade sazonal e a estabilidade atmosférica. Para identificar padrões recorrentes associados aos jatos de baixos níveis noturnos, é aplicado o algoritmo de aprendizado de máquina não supervisionado K-means, utilizado para agrupar condições atmosféricas semelhantes.A análise integrada deverá proporcionar uma compreensão abrangente dos fatores sazonais que governam os jatos de baixos níveis noturnos e quantificar sua influência sobre o potencial de energia eólica no Rio Grande do Norte. Os resultados contribuirão para o aprimoramento da previsão

Palavras-chave: Energia eólica.,ERA5. Python

TITLE: INFLUENCE OF NIGHTTIME WIND JETS ON THE PERFORMANCE OF WIND FARMS IN RIO GRANDE DO NORTE - BRAZIL

Abstract

Brazil, with its vast wind energy potential concentrated mainly in the Northeast region, plays a strategic role in the global energy transition toward greater use of renewable energy sources. However, the efficiency of wind power generation is strongly influenced by seasonal variability and by the alternation between daytime and nighttime atmospheric conditions, which affect wind behavior and the availability of the wind resource. In this context, the main objective of this study is to determine the quantitative relationship between the climatological characteristics of nocturnal low-level jets and

wind energy potential along the coast of Rio Grande do Norte, Brazil. The methodology combines atmospheric reanalysis data from the ERA5 system of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), including surface variables and multiple pressure levels, to investigate seasonal variability and atmospheric stability. To identify recurrent patterns associated with nocturnal low-level jets, the unsupervised machine learning algorithm K-means is applied to group similar atmospheric conditions. The integrated analysis is expected to provide a comprehensive understanding of the seasonal factors governing nocturnal low-level jets and to quantify their influence on wind energy potential in Rio Grande do Norte. The results will contribute to improving forecasting of key climatological variables.

Keywords: Wind energy,ERA5, Python

Introdução

A transição energética global tem sido fortemente impulsionada pelo desenvolvimento e pela utilização intensificados de fontes de energia renováveis (Yue et al., 2021). Entre todas as formas renováveis de geração de eletricidade, a energia eólica ocupa a segunda posição em termos de capacidade instalada, ficando atrás apenas da energia hidrelétrica, e vem apresentando um rápido crescimento (Panwar, Kaushik & Kothari, 2011).

O estado do Rio Grande do Norte consolidou-se como uma das principais forças na expansão da energia eólica no Brasil, liderando a geração nacional com uma capacidade instalada operacional de 8 GW. De acordo com dados da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico, da Ciência, da Tecnologia e da Inovação do Rio Grande do Norte (SEDEC-RN), o estado possui mais de 2.800 aerogeradores em operação, representando aproximadamente 30,20% da produção de energia eólica do país. Diante da magnitude dessa infraestrutura, torna-se essencial a realização de estudos detalhados sobre as variáveis técnicas e operacionais que regem esses sistemas de conversão de energia.

As características climáticas do estado constituem um fator de extrema importância para a compreensão do cenário da energia eólica no Rio Grande do Norte. O clima do estado é classificado como semiárido (abrangendo a região entre o Rio Grande do Norte e a Bahia) e litorâneo, apresentando um gradiente de precipitação (entre o Rio Grande do Norte e Sergipe) (Alvares et al., 2013). Devido à sua localização geográfica, o Rio Grande do Norte apresenta condições de vento altamente favoráveis, em razão de sua proximidade com a Linha do Equador e da presença dos ventos alísios, com velocidades médias anuais superiores a 7 m/s a 100 metros de altura, concentradas principalmente nas regiões central, centro-sul, norte e nordeste do estado (Atlas Solar e Eólico do Rio Grande do Norte, 2022).

O jato noturno é um fenômeno meteorológico que ocorre predominantemente durante a noite ou nas primeiras horas da manhã em diversas regiões do mundo, apresentando significativa variabilidade e ocorrendo tanto sobre terrenos planos quanto sobre terrenos complexos (Correa, 2025).

O objetivo central deste estudo é investigar e determinar as correlações entre as variáveis climatológicas que modulam os jatos noturnos e a eficiência da conversão de energia eólica na região costeira do Rio Grande do Norte. A análise busca compreender como as variações na intensidade e na altura do núcleo do jato interferem no perfil vertical do vento, impactando diretamente a produção de energia nos parques eólicos locais.

Diante da crescente complexidade da matriz elétrica brasileira, o mapeamento sistemático e detalhado dos parâmetros sazonais e estruturais desses eventos micrometeorológicos representa uma contribuição científica de grande relevância. Essa caracterização não apenas preenche uma lacuna de conhecimento acerca da dinâmica atmosférica da Camada Limite Estável (Stable Boundary Layer – SBL) no Rio Grande do Norte, mas também contribui para o desenvolvimento de modelos preditivos mais precisos. Em última análise, este estudo fornece suporte técnico essencial para a otimização das estratégias operacionais e para o planejamento de novos projetos, reduzindo as incertezas associadas à variabilidade do recurso eólico e fortalecendo a resiliência do sistema de geração de energia renovável no estado.

Metodologia

A análise dos dados atmosféricos foi realizada a partir de informações obtidas do conjunto de dados de reanálise ERA5. A escolha dessa plataforma justifica-se pela disponibilidade de dados com elevada confiabilidade e ampla cobertura espacial e temporal. Devido à ausência de parcerias com empresas para o fornecimento de dados observacionais destinados à análise, foram utilizados exclusivamente dados provenientes de reanálise neste estudo.

A aquisição dos dados do ERA5 foi realizada para os anos de 2024 e 2025, considerando as componentes da velocidade do vento (u e v) e a temperatura no nível de pressão de 1000 hPa. A seleção desse nível de pressão foi baseada na proximidade de sua altitude correspondente com a altura dos aerogeradores instalados na região costeira do Rio Grande do Norte. Considerando a extensão territorial do estado, a utilização de múltiplos níveis de pressão dificultaria a representação gráfica e a interpretação dos resultados, uma vez que seria necessário representar simultaneamente diferentes variáveis espaciais, como latitude, longitude, altitude e velocidade do vento ou temperatura. Dessa forma, considerando também a altitude média dos parques eólicos presentes no estado, adotou-se o nível de 1000 hPa como referência para as análises.

O processamento dos dados foi realizado por meio da linguagem de programação Python, utilizada para interpretar, organizar e manipular os conjuntos de dados, além de possibilitar a representação gráfica e o cálculo de valores médios. Para essa finalidade, foram empregadas bibliotecas específicas para o tratamento dos arquivos no formato .nc (NetCDF), permitindo sua integração e posterior processamento.

Para avaliar o comportamento dos jatos de baixos níveis noturnos, foram analisadas a magnitude da velocidade do vento e a temperatura em três horários distintos: 04:00, 16:00 e 22:00. A escolha desses horários está relacionada à necessidade de comparar

diferentes condições atmosféricas ao longo do ciclo diário, especialmente os períodos diurno e noturno, sendo horários semelhantes utilizados em estudos anteriores sobre a dinâmica dos jatos de baixos níveis.

Devido ao grande volume de dados obtidos, foi necessário utilizar técnicas de cálculo de médias e métodos de aprendizado de máquina para a identificação e interpretação de padrões atmosféricos. Para a análise anual da temperatura e da velocidade do vento, foram calculadas médias mensais para cada ponto de latitude e longitude presente no conjunto de dados. Dessa maneira, cada coordenada recebeu um valor correspondente à média mensal da variável analisada. Além disso, com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial das variáveis, foi calculado o desvio-padrão para cada ponto da área de estudo.

Ao final da etapa de processamento, foi obtido um conjunto de representações gráficas que descrevem o comportamento anual da temperatura e das variáveis relacionadas ao vento em todo o território do Rio Grande do Norte. Essas representações permitem visualizar a variação das condições atmosféricas do estado ao longo do ano, identificar características associadas à ocorrência dos jatos de baixos níveis noturnos e avaliar de que maneira esses fenômenos atmosféricos podem influenciar o desempenho dos parques eólicos instalados na região.

Resultados e Discussões

Após o agrupamento dos dados de acordo com os horários descritos na metodologia, foi possível analisar o comportamento médio da temperatura e da velocidade do vento no estado do Rio Grande do Norte. Os resultados indicaram que a região costeira concentra as maiores velocidades médias do vento em todos os anos e horários analisados, com valores superiores a 10,5 m/s. Esse comportamento evidencia a influência das condições atmosféricas costeiras sobre a disponibilidade do recurso eólico no estado.

Em relação aos efeitos dos jatos de baixos níveis noturnos, observou-se uma intensificação das regiões que apresentam maiores valores médios de velocidade do vento, enquanto as áreas com menores valores tendem a apresentar redução desses valores, principalmente no horário das 04:00. Também foi identificada uma semelhança no comportamento do jato entre os anos de 2024 e 2025, uma vez que as regiões de maior e menor velocidade apresentam padrões espaciais semelhantes nos últimos dois anos. Esse resultado sugere a recorrência de determinadas características espaciais do fenômeno durante o período analisado.

A análise da variabilidade da velocidade do vento revelou valores elevados em algumas áreas do litoral norte do estado, especialmente no horário das 22:00, comportamento observado em ambos os anos analisados. Em contrapartida, regiões mais afastadas do litoral apresentaram menor variabilidade, com destaque para as áreas próximas à divisa com o estado da Paraíba. Dessa forma, os resultados indicam que a ocorrência do jato noturno está associada a alterações significativas na distribuição espacial da velocidade do vento, principalmente durante o período noturno.

Quanto à distribuição da temperatura, verificou-se que os menores valores médios em todo o território estadual ocorrem às 04:00. Ao longo do dia, a temperatura média tende a aumentar de maneira geral, embora a região costeira permaneça como a área de menores temperaturas entre os horários analisados. A comparação entre os padrões de temperatura e velocidade do vento indica uma relação espacial entre essas variáveis, uma vez que as regiões costeiras que apresentam menores temperaturas também estão associadas a valores médios de velocidade do vento entre moderados e elevados, incluindo as áreas de maior velocidade observadas no estado.

A variabilidade da temperatura apresentou seus maiores valores na região central do Rio Grande do Norte, área mais afastada da zona costeira é caracterizada por temperaturas médias mais elevadas. Por outro lado, nas proximidades da divisa com o estado do Ceará, foram observados menores valores de variabilidade térmica. Essa região também apresentou velocidades de vento moderadas quando comparada às áreas de maior intensidade identificadas no litoral.

A aplicação do algoritmo de aprendizado de máquina não supervisionado K-means possibilitou a identificação de regiões com características atmosféricas semelhantes em relação à magnitude da velocidade do vento. Os agrupamentos obtidos indicaram áreas com comportamentos mais homogêneos e relativamente estáveis durante o período de observação. Ressalta-se, entretanto, que os agrupamentos identificados em diferentes horários não apresentam necessariamente correspondência direta entre si, uma vez que o algoritmo realiza a classificação de acordo com as características predominantes em cada conjunto de dados analisado.

Em relação à velocidade do vento, a região costeira norte do estado apresentou, de maneira geral, comportamento associado a um único agrupamento, indicando características relativamente homogêneas nessa área. Uma exceção foi observada no horário das 16:00, quando parte da região costeira passou a apresentar características semelhantes às de um agrupamento identificado na área oceânica, estendendo-se em direção ao litoral. Esse comportamento também alcançou parte do litoral sul, aproximando-se da região da capital, Natal.

Para a temperatura, a região costeira também apresentou comportamento predominantemente homogêneo, sendo caracterizada essencialmente por um único agrupamento nos diferentes horários analisados. Entretanto, às 22:00, observou-se uma alteração no padrão espacial dos agrupamentos, caracterizada por uma divisão que se inicia próxima ao litoral norte e se estende transversalmente pelo território estadual. Esse comportamento evidencia uma mudança na distribuição espacial das características térmicas durante o período noturno.

De maneira geral, os resultados indicam que a região costeira do Rio Grande do Norte apresenta características atmosféricas distintas do interior do estado, especialmente em relação à velocidade do vento e à temperatura. A maior intensidade dos ventos no litoral, associada às variações observadas durante o período noturno, evidencia a importância dos jatos de baixos níveis para a compreensão da distribuição espacial e temporal do recurso eólico. Além disso, a identificação de padrões semelhantes entre 2024 e 2025 sugere a existência de características recorrentes no comportamento atmosférico da região, enquanto a aplicação do K-means permitiu delimitar áreas com

comportamentos semelhantes, contribuindo para uma interpretação mais detalhada da variabilidade espacial das condições atmosféricas.

Conclusão

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que o estado do Rio Grande do Norte apresenta uma distribuição espacial bem definida da velocidade do vento e da temperatura, com as maiores intensidades de vento concentradas de forma consistente na região costeira, especialmente no litoral norte, onde estão localizados importantes parques eólicos do estado. Nessas áreas, foram identificadas velocidades médias anuais superiores a 10,5 m/s, confirmando o elevado potencial eólico da região e reforçando a importância estratégica do Rio Grande do Norte para o setor de geração de energia eólica no Brasil.

A comparação entre os horários analisados (04:00, 16:00 e 22:00) mostrou que as condições noturnas, especialmente durante as primeiras horas da manhã, estão associadas à intensificação da velocidade do vento na região costeira. Esse comportamento é compatível com a ocorrência dos jatos de baixos níveis noturnos, que promovem o aumento da intensidade dos ventos na baixa troposfera e podem proporcionar condições favoráveis à geração de energia eólica. A semelhança observada entre os anos de 2024 e 2025 indica que esses padrões atmosféricos apresentam certa persistência, sugerindo a existência de um sinal climatológico recorrente na região.

A análise do desvio-padrão mostrou que o litoral norte apresenta a maior variabilidade temporal da velocidade do vento, principalmente às 22:00, indicando uma influência significativa dos jatos noturnos sobre a modulação do recurso eólico. Em contrapartida, as regiões mais afastadas do litoral apresentaram menores velocidades médias e menor variabilidade. Os campos de temperatura apresentaram um comportamento inverso ao observado para a velocidade do vento, com os menores valores médios concentrados na região costeira e durante as primeiras horas da manhã. Esse comportamento é consistente com o resfriamento radiativo noturno e com o estabelecimento de condições atmosféricas mais estáveis, fatores associados ao desenvolvimento dos jatos de baixos níveis noturnos.

A aplicação do algoritmo de aprendizado de máquina não supervisionado K-means mostrou-se eficaz na identificação de regiões com características atmosféricas semelhantes. Tanto para a velocidade do vento quanto para a temperatura, os agrupamentos destacaram a região costeira como uma área relativamente homogênea, caracterizada por condições meteorológicas persistentes e favoráveis ao aproveitamento do recurso eólico. Os resultados também evidenciaram zonas de transição entre as áreas oceânicas e continentais, sugerindo a influência das condições atmosféricas associadas ao ambiente marinho sobre o regime de ventos do estado.

De maneira geral, o estudo confirma que os jatos de baixos níveis noturnos constituem um mecanismo atmosférico relevante para a intensificação e a modulação do recurso eólico no Rio Grande do Norte.

Referências

Alvares, Carlos A., Stape, José L., Sentelhas, Paulo C., de Moraes Gonçalves, José L., and Sparovek, Gerd. “Köppen’s Climate Classification Map for Brazil.” Meteorologische Zeitschrift Vol. 22 No. 6 (2013): pp. 711–728. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507.

Correa, Michel Frederico França. “Analysis of the Climatology of Nocturnal Jets and Their Influence on the Performance of a Wind Farm in Complex Terrain.” Master’s Thesis. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, 2025.

Panwar, N. L., Kaushik, S. C., and Kothari, S. “Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: A Review.” Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 15 No. 3 (2011): pp. 1513–1524. DOI 10.1016/j.rser.2010.11.037.

Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico do Rio Grande do Norte. Atlas Eólico e Solar do Estado do Rio Grande do Norte. SEDEC/SENAI/FIERN, Natal, Brazil (2022). Available at: Atlas Eólico e Solar do Estado do Rio Grande do Norte.

Yue, Ming, Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., and Hissel, D. “Hydrogen Energy Systems: A Critical Review of Technologies, Applications, Trends and Challenges.” Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 146 (2021): Article 111180. DOI 10.1016/j.rser.2021.111180.

CÓDIGO: ET0913

AUTOR: JAMILLE PESSOA CAVALCANTI

ORIENTADOR: ADRIANA CAVALCANTE MARQUES

TÍTULO: Ordenação multicritério dos cursos de Engenharia de Produção no Brasil: aplicação do FITradeoff aos indicadores do Inep de 2023

Resumo

Este estudo desenvolve uma ordenação multicritério dos cursos de Engenharia de Produção no Brasil com base nos indicadores do Inep referentes a 2023. A pesquisa é aplicada, quantitativa e documental e adota o método FITradeoff para a problemática de ordenação. A base inicial continha 637 cursos; após a exclusão de 62 registros sem Conceito Enade contínuo, a matriz de consequências reuniu 575 cursos, vinculados a 437 instituições e distribuídos por 25 unidades federativas. Foram selecionados quatro critérios de maximização: Conceito Enade contínuo, CPC contínuo, proporção de doutores e nota padronizada de infraestrutura. Foram adotadas funções de valor lineares e a seguinte ordenação dos critérios: Enade, CPC, doutores e infraestrutura. A elicitação por decomposição demandou 19 perguntas e resultou em 213 níveis de ordenação. Os cursos mais bem posicionados foram os da UFRGS, em Porto Alegre; da UFSC, em Florianópolis; e da UFF, em Niterói. Os cursos presenciais corresponderam a 89,7% da amostra e ocuparam integralmente as posições de 1 a 50; enquanto o primeiro curso a distância apareceu na posição 96. O modelo oferece um procedimento transparente e replicável, através de método multicritério robusto, para integrar indicadores educacionais e preferências do decisor, ampliando a comparação entre cursos e fornecendo subsídios para benchmarking, gestão acadêmica e avaliação da qualidade do ensino superior.

Palavras-chave: FITradeoff. Engenharia de Produção. Ensino superior. Ranking.

TITLE: Multicriteria Ranking of Production Engineering Programs in Brazil: An Application of FITradeoff to 2023 INEP Indicators

Abstract

This study develops a multicriteria ranking of Production Engineering programs in Brazil based on Inep indicators for 2023. This applied, quantitative, and document-based study employs the FITradeoff method to address a ranking problem. The initial dataset comprised 637 programs; after excluding 62 records without a continuous Enade score, the consequence matrix included 575 programs from 437 institutions across 25 Brazilian federative units. Four criteria to be maximized were selected: continuous Enade score, continuous Preliminary Course Score (CPC), proportion of faculty members holding doctoral degrees, and standardized infrastructure score. Linear value functions were adopted, and the criteria were ranked in the following order of importance: Enade, CPC, doctoral qualifications, and infrastructure. Decomposition-based elicitation required 19 questions and resulted in 213 ranking levels. The top-ranked programs were those offered by UFRGS in Porto Alegre, UFSC in Florianópolis, and UFF in Niterói. On-campus programs accounted for 89.7% of the sample and occupied all positions from 1 to 50, whereas the highest-ranked distance-learning program appeared at position 96. Based on a robust multicriteria method, the model provides a transparent and replicable procedure for integrating educational indicators and decision-maker preferences, supporting comparisons among programs and informing benchmarking, academic management, and higher education quality assessment.

Keywords: FITradeoff. Production Engineering. Higher education. Ranking.

Introdução

A avaliação da educação superior cumpre funções regulatórias, formativas e de transparência pública. No Brasil, o Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior (Sinaes) articula a avaliação das instituições, dos cursos e do desempenho discente, e seus resultados subsidiam tanto a regulação quanto a gestão acadêmica (BRASIL, 2004). Entre os indicadores divulgados pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep), o Conceito Enade expressa o desempenho dos concluintes, enquanto o Conceito Preliminar de Curso (CPC) combina desempenho, valor agregado, corpo docente e percepções discentes sobre as condições de oferta. Embora esses indicadores forneçam referências oficiais, nenhum deles, isoladamente, representa toda a complexidade envolvida na noção de qualidade de um curso de graduação.

A construção de rankings educacionais torna comparações acessíveis, mas também incorpora escolhas normativas sobre indicadores, escalas e formas de agregação. A literatura alerta que pequenas mudanças na modelagem podem alterar posições e que indicadores correlacionados podem ampliar indevidamente determinadas dimensões (DILL; SOO, 2005; SAISANA; D'HOMBRES; SALTELLI, 2011). Portanto, a utilidade de uma ordenação depende da explicitação de seus pressupostos, da rastreabilidade dos dados e da possibilidade de examinar como as preferências influenciam o resultado.

Os métodos de Apoio Multicritério à Decisão oferecem uma estrutura adequada para problemas nos quais múltiplos critérios devem ser considerados simultaneamente. No

âmbito da Teoria de Valor Multiatributo (MAVT), o FITradeoff, baseado no modelo tradicional do Tradeoff (KEENEY; RAIFFA, 1976), utiliza informação parcial sobre as preferências do decisor para delimitar relações de dominância sem exigir a determinação antecipada de pesos exatos. A elicitação é conduzida de forma interativa e pode ser interrompida quando o nível de discriminação alcançado for suficiente ao propósito da análise (DE ALMEIDA et al., 2016; FREJ; DE ALMEIDA; COSTA, 2019). Essa característica é particularmente pertinente quando há muitas alternativas e o decisor busca uma ordenação transparente, mas não consegue ou não deseja estabelecer compensações numéricas precisas entre os critérios.

No caso da Engenharia de Produção, a disponibilidade de dados abertos do ciclo avaliativo de 2023 permite comparar cursos sob dimensões associadas ao desempenho discente e às condições de oferta. Entretanto, permanece a necessidade de uma abordagem que integre essas dimensões, registre explicitamente as preferências empregadas e preserve as limitações inerentes aos dados. Assim, o objetivo deste estudo foi construir e analisar uma ordenação multicritério dos cursos de Engenharia de Produção no Brasil, mediante aplicação do FITradeoff aos indicadores do Inep. Especificamente, buscou-se estruturar a matriz de consequências, elicitar preferências para os critérios, obter os níveis de ordenação e examinar padrões por instituição, unidade federativa e modalidade de ensino. A contribuição consiste em um procedimento replicável de apoio à análise, e não em uma classificação oficial ou definitiva da qualidade dos cursos.

Metodologia

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa e finalidade exploratória e descritiva, apoiada em pesquisa documental nas bases públicas do Inep. A unidade de análise foi o curso de graduação em Engenharia de Produção identificado pelo código único do e-MEC. O desenvolvimento seguiu o procedimento de construção de modelos multicritério proposto por de Almeida (2013), organizado em três fases iterativas, como ilustra a Figura 1: fase preliminar; modelagem de preferências e escolha do método; e finalização e aplicação.

Na fase preliminar, definiu-se o problema como uma problemática de ordenação de cursos segundo indicadores acadêmicos e de condições de oferta referentes ao ciclo de 2023, os quais são os últimos dados disponíveis publicados pelo Inep. O decisor escolhido foi um representante do colegiado acadêmico de uma instituição de ensino federal do curso de Engenharia de Produção. A planilha de origem reunia 637 registros de Engenharia de Produção. Foram examinados seis critérios conceituais: Conceito Enade, CPC, infraestrutura, qualificação docente, produção científica e empregabilidade de egressos. Produção científica e empregabilidade não foram incorporadas porque as fontes públicas consultadas não permitiram estabelecer, com confiabilidade e cobertura nacional, a ligação entre essas medidas e cada código de curso. Após a exclusão de 62 registros sem Conceito Enade contínuo, obteve-se uma matriz completa com 575 alternativas. As unidades federativas do Acre e de Roraima não permaneceram no recorte final.

Foram utilizados quatro critérios, com apresenta o Quadro 1, todos com sentido de maximização: (c1) Conceito Enade contínuo, em escala de 0 a 5, representando o

desempenho relativo dos concluintes; (c2) CPC contínuo, também de 0 a 5, indicador composto que integra desempenho, valor agregado e condições de oferta; (c3) proporção de docentes com doutorado, expressa entre 0 e 1; e (c4) nota padronizada de infraestrutura e instalações físicas, de 0 a 5, derivada da percepção dos estudantes concluintes. A infraestrutura não corresponde à contagem de laboratórios, bibliotecas ou equipamentos. A identificação de cada alternativa pelo código do curso evitou agregar indevidamente ofertas da mesma instituição em municípios distintos.

Na segunda fase, verificou-se a adequação de um modelo compensatório aditivo no âmbito da Teoria de Valor Multiatributo. Para uma alternativa , o valor global pode ser representado por , em que é a função de valor intracritério, é a constante de escala, e . Foram declaradas funções de valor lineares para os quatro critérios. Na ordenação das constantes de escala, ilustrada na Figura 2, o decisor estabeleceu c1 > c2 > c3 > c4, isto é, Conceito Enade, CPC, proporção de doutores e infraestrutura. Optou-se pelo FITradeoff para ordenação porque o método opera com regiões admissíveis das constantes de escala e atualiza as relações de dominância à medida que o decisor fornece preferências parciais, reduzindo a exigência de indiferenças exatas (DE ALMEIDA et al., 2016; FREJ; DE ALMEIDA; COSTA, 2019).

Na fase de finalização, a matriz foi inserida no sistema de apoio à decisão FITradeoff. A elicitação por decomposição apresentou pares de consequências hipotéticas ao decisor a cada iteração. O sistema utilizou a respostas a essas perguntas da elicitação como restrições do modelo matemático para comparar as 575 alternativas e construir uma relação de dominância entre as alternativas. O processo exigiu ao decisor a resposta a 19 perguntas da elicitação até alcançar um resultado que foi satisfatório. Os resultados parciais puderam ser visualizados a qualquer momento da elicitação através do diagrama de Hasse (Figura 3) e em formato tabular. O decisor resolveu parar o processo de elicitação após as 19 perguntas e resultou em um ranking com 213 níveis. Cursos no mesmo nível do ranking pode representar equivalência ou ausência de dominância com a informação de preferência disponível, não necessariamente igualdade em todos os indicadores.

Por fim, realizou-se análise descritiva das posições, dos empates e da distribuição dos cursos por instituição, unidade federativa e modalidade de ensino. Calcularam-se frequências, proporções, melhor posição, média, mediana e desvio-padrão das posições. Como posições são medidas ordinais e os grupos têm tamanhos distintos, médias estaduais e institucionais foram empregadas apenas como sínteses exploratórias e interpretadas juntamente com o número de cursos e a mediana. Adicionalmente, foram estimadas correlações de Spearman entre os quatro critérios para examinar redundância.

Resultados e Discussões

A matriz final compreendeu 575 cursos vinculados a 437 instituições e distribuídos por 25 unidades federativas. O número de alternativas foi substancialmente maior do que o número de níveis de ordenação: 213 posições distintas, com média de 126,11, mediana de 135 e desvio-padrão de 47,18. A diferença decorre da presença de cursos agrupados no mesmo nível; o maior agrupamento ocorreu na posição 152, com 78 cursos. Assim, a

posição deve ser lida como nível ordinal gerado pelas relações de preferência e dominância disponíveis, e não como distância cardinal de qualidade entre cursos.

Conforme apresenta a Tabela 1, o curso de código 45020, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre, ocupou a primeira posição. Em seguida apareceram o curso 23960 da Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis, e o curso 12727 da Universidade Federal Fluminense, em Niterói. O quarto nível também foi ocupado pela UFSC, seguido pela Universidade Federal de Viçosa. Entre os dez primeiros cursos, todos eram presenciais e pertenciam a instituições públicas federais. Consideradas as posições de 1 a 25, os empates produziram 27 cursos, dos quais 24 eram públicos (88,9%). Esse padrão é coerente com a elevada presença, entre os primeiros colocados, de cursos com altos valores de Enade e CPC e grande proporção de doutores, critérios situados nas três primeiras posições da ordenação.

Os desempenhos dos primeiros cursos ilustram a natureza compensatória do modelo. O líder UFRGS apresentou Conceito Enade de 4,924, CPC de 4,644, proporção de doutores de 0,931 e infraestrutura padronizada de 3,133. A UFSC, na segunda posição, registrou Enade de 4,868, CPC de 4,465 e proporção de doutores de 0,981, apesar de infraestrutura de 1,762. Por outro lado, o Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, na posição 15, combinou Enade de 4,281 e CPC de 4,150 com infraestrutura de 4,269. Esses casos mostram que o método não selecionou máximos isolados: as posições decorreram da combinação dos desempenhos com a ordem dos pesos dos critérios elicitados.

No recorte institucional, a UFSC apresentou o resultado mais uniforme entre as instituições com mais de um curso nas primeiras posições: três cursos, melhor posição 2, média 4,33 e mediana 4, todos no top 25. A UFRJ teve dois cursos, nas posições 6 e 22, com média e mediana 14. A UFSCar alcançou as posições 10 e 16, com média 13. A UFRGS, embora detentora do curso líder, apresentou média 30 para seus dois cursos, evidenciando que a melhor posição de uma instituição não resume necessariamente o conjunto de suas ofertas. A UFRN ocupou a posição 22 com o curso de Natal. Por isso, comparações institucionais devem preservar o código do curso e o município, evitando atribuir a toda a instituição o desempenho de uma única oferta.

A distribuição territorial foi concentrada conforme apresenta a Tabela 2. São Paulo reuniu 162 cursos (28,2%), seguido por Minas Gerais, com 79 (13,7%), Rio de Janeiro, com 63 (11,0%), Paraná, com 51 (8,9%), Rio Grande do Sul, com 41 (7,1%), e Santa Catarina, com 37 (6,4%). Em conjunto, esses seis estados concentraram 75,3% das alternativas. O Distrito Federal apresentou a menor posição média (11,00), mas possuía apenas um curso, o que impede generalização. Entre estados com pelo menos dez cursos, Espírito Santo apresentou média 88,92 (n = 12), Ceará 98,76 (n = 17), Santa Catarina 110,08 (n = 37) e Rio Grande do Sul 110,63 (n = 41). As médias não reproduzem a melhor posição individual: o Rio Grande do Sul possui o curso líder, enquanto Santa Catarina tem três cursos no top 25. Essa diferença reforça a necessidade de analisar simultaneamente tamanho do grupo, mediana, dispersão e melhores posições.

No Rio Grande do Norte, os cinco cursos apareceram nas posições 22, 78, 130, 134 e 185, resultando em média 109,80, mediana 130 e desvio-padrão 61,99. A elevada dispersão mostra heterogeneidade entre as ofertas do estado. O melhor resultado foi o

curso da UFRN em Natal, seguido pelos cursos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido em Mossoró e Angicos; as duas ofertas restantes pertenciam à Universidade Potiguar, uma presencial e outra a distância.

Quanto à modalidade, 516 cursos eram presenciais (89,7%) e 59 eram ofertados a distância (10,3%). A posição média dos cursos presenciais foi 122,72, com mediana 133,50; para a educação a distância, a média foi 155,71 e a mediana 152. Devido aos empates, as posições de 1 a 25 abrangeram 27 cursos e as de 26 a 50, outros 27; todos eram presenciais. O primeiro curso a distância apareceu na posição 96. Na faixa de 51 a 100, havia apenas um curso a distância; nas faixas de 101 a 150 e de 151 a 213, esse número subiu para 16 e 42, respectivamente. Assim, conforme ilustra a Figura 4, 42 dos 59 cursos à distância (71,2%) estavam na última faixa, embora representassem 17,2% dos 244 cursos nela contidos. O resultado é descritivo e não autoriza inferir que a modalidade, por si só, cause menor desempenho, mas ressalta um achado que requer maior aprofundamento para identificar as causas para esse desempenho aquém dos cursos à distância.

A análise de associação entre os critérios revelou correlação de Spearman elevada entre Conceito Enade e CPC ($\rho = 0{,}703$) e moderada entre CPC e proporção de doutores ($\rho = 0{,}514$), conforme apresenta a Tabela 3. A correlação entre CPC e infraestrutura foi 0,308; entre Enade e infraestrutura, 0,087. Esses resultados são esperados em parte porque o CPC incorpora o Enade, a proporção de doutores e a infraestrutura em sua própria composição. A escolha de manter o CPC e seus componentes permite ao decisor realçar dimensões específicas. Esse achado converge com as advertências de Saisana, D'Hombres e Saltelli (2011) sobre redundância e sensibilidade em indicadores compostos. Em aplicações futuras, recomenda-se comparar a especificação atual com modelos que utilizem apenas os componentes desagregados ou que substituam o CPC por dimensões não aninhadas.

O potencial inovador da aplicação reside na utilização de informação parcial de preferências para ordenar um conjunto amplo de cursos sem fixar pesos arbitrários. As 19 respostas do decisor foram suficientes para reduzir o espaço de combinações admissíveis e produzir 213 níveis, tornando explícitos os casos em que a informação disponível não permite discriminação adicional. Em comparação com rankings de peso fixo, essa característica aumenta a rastreabilidade do processo e reduz a aparência de precisão excessiva. O produto pode apoiar estudantes, gestores acadêmicos e formuladores de políticas na exploração de cenários, desde que a ordenação seja apresentada juntamente com seus critérios, preferências e limitações.

Três restrições delimitam a validade externa. Primeiro, a análise abrange apenas cursos com dados completos no ciclo de 2023; 62 registros foram excluídos e Acre e Roraima não foram representados. Segundo, a produção científica e empregabilidade, inicialmente previstas, não foram incluídas por ausência de ligação pública confiável no nível do curso. Terceiro, as preferências refletem o decisor participante desta aplicação; outros atores podem estabelecer ordens ou julgamentos distintos. Portanto, o ranking deve ser entendido como resultado de um modelo decisório documentado, replicável e revisável, e não como medida universal de qualidade.

Conclusão

O estudo alcançou o objetivo de construir e analisar uma ordenação multicritério dos cursos de Engenharia de Produção no Brasil mediante o FITradeoff e dados oficiais do Inep referentes a 2023. A matriz final reuniu 575 cursos, 437 instituições e 25 unidades federativas. Com quatro critérios, funções de valor lineares, e ordenação dos critérios sendo Enade, CPC, proporção de doutores e infraestrutura e 19 respostas de elicitação, o método produziu 213 níveis de ordenação. Os primeiros resultados corresponderam aos cursos da UFRGS em Porto Alegre, da UFSC em Florianópolis e da UFF em Niterói.

A análise complementar evidenciou concentração territorial das alternativas, desempenho heterogêneo dentro de estados e instituições e predominância de cursos presenciais nas primeiras posições. Nenhum curso a distância apareceu entre as posições 1 e 50, e 71,2% das ofertas a distância situaram-se na faixa de 151 a 213. Esses achados devem ser interpretados como associações descritivas condicionadas aos indicadores e às preferências utilizadas.

A principal contribuição metodológica é demonstrar que a ordenação de um conjunto numeroso de cursos pode ser conduzida com informação parcial de preferências, preservando relações de dominância e tornando visíveis os níveis em que não há discriminação suficiente. A principal limitação é a dependência estrutural entre o CPC e três dimensões utilizadas separadamente, além da ausência de produção científica, empregabilidade e validação com múltiplos decisores.

Como trabalhos futuros, recomenda-se reestruturar a família de critérios para eliminar sobreposições, incorporar indicadores independentes de trajetória dos egressos e produção acadêmica, conduzir elicitações com diferentes perfis de interessados e realizar análises de sensibilidade entre cenários de preferência. Também se sugere repetir a aplicação em ciclos subsequentes do Enade, permitindo avaliar a estabilidade temporal das posições. Com essas extensões, o modelo poderá apoiar processos de autoavaliação, benchmarking e definição de prioridades de melhoria com maior robustez.

Referências

BRASIL. Lei nº 10.861, de 14 de abril de 2004. Institui o Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior - Sinaes. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 15 abr. 2004.

DE ALMEIDA, A. T. Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério. São Paulo: Atlas, 2013.

DE ALMEIDA, A. T.; DE ALMEIDA, J. A.; COSTA, A. P. C. S.; DE ALMEIDA-FILHO, A. T. A new method for elicitation of criteria weights in additive models: flexible and interactive tradeoff. European Journal of Operational Research, v. 250, n. 1, p. 179-191, 2016. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.08.058.

DE ALMEIDA, A. T.; FREJ, E. A.; ROSELLI, L. R. P.; COSTA, A. P. C. S. A summary on FITradeoff method with methodological and practical developments and future perspectives. Pesquisa Operacional, v. 43, e268356, 2023. DOI: 10.1590/0101-7438.2023.043spe1.00268356.

DILL, D. D.; SOO, M. Academic quality, league tables, and public policy: a cross-national analysis of university ranking systems. Higher Education, v. 49, p. 495-533, 2005. DOI: 10.1007/s10734-004-1746-8.

FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. Using data visualization for ranking alternatives with partial information and interactive tradeoff elicitation. Operational Research, v. 19, n. 4, p. 909-931, 2019. DOI: 10.1007/s12351-018-00444-2.

INEP - INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. Conceito Preliminar de Curso (CPC). Brasília, DF: Inep, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/pesquisas-estatisticas-e-indicadores/indicadores-de-qualidade-da-educacao-superior/conceito-preliminar-de-curso-cpc. Acesso em: 27 ago. 2026.

INEP - INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. Indicadores de Qualidade da Educação Superior: edição 2023. Brasília, DF: Inep, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/inep/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos/indicadores-educacionais/indicadores-de-qualidade-da-educacao-superior. Acesso em: 27 ago. 2026.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs. New York: Wiley, 1976.

SAISANA, M.; D'HOMBRES, B.; SALTELLI, A. Rickety numbers: volatility of university rankings and policy implications. Research Policy, v. 40, n. 1, p. 165-177, 2011. DOI: 10.1016/j.respol.2010.09.003.

Anexos



Figura 1 - Framework metodológico da aplicação do FITradeoff aos cursos de Engenharia de Produção



Quadro 1 - Critérios empregados na matriz de consequências



Figura 2 - Ordenação das constantes de escala no sistema FITradeoff



Figura 3 - Diagrama de Hasse com os primeiros níveis da ordenação



Figura 4 - Distribuição das modalidades de ensino por faixa da ordenação



Tabela 1 - Vinte e oito primeiros cursos na ordenação FITradeoff



Tabela 2 - Síntese descritiva por unidade federativa



Tabela 3 - Correlações de Spearman entre os critérios da matriz final

CÓDIGO: ET0928

AUTOR: ELLIAQUIN AMIN GABRIEL DA SILVA

ORIENTADOR: VALDEMIR PRAXEDES DA SILVA NETO

TÍTULO: Desenvolvimento de Sensor Micro-ondas Vestível em FR4 para Rastreamento de Temperatura

Resumo

A rápida expansão do ecossistema da Internet das Coisas (IoT) e dos sistemas vestíveis demanda mecanismos inovadores de autossuficiência energética para mitigar a dependência de baterias químicas e reduzir o impacto ambiental de seu descarte. A tecnologia de Radio Frequency Energy Harvesting (RFEH) surge como alternativa promissora, embora enfrente desafios de eficiência devido à instabilidade dos sinais eletromagnéticos ambientais. Este trabalho tem como objetivo projetar, otimizar e caracterizar um sensor planar de micro-ondas multifuncional baseado em metassuperfícies ressonantes sobre substrato de baixo custo FR4, capaz de atuar simultaneamente como fonte de captação energética e transdutor passivo para medição de temperatura e umidade. A metodologia quantitativa-experimental inicia-se por uma revisão sistemática e meta-análise. Posteriormente, o arranjo geométrico integrando estruturas de Ressonador de Anel Dividido (SRR) e antenas patch é modelado no software Ansys HFSS para operar próximo a 2,4 GHz, seguido pelo design do circuito de acoplamento e retificação no Keysight ADS. Espera-se validar uma curva de calibração fidedigna e demonstrar a viabilidade de uma célula unitária planar totalmente autônoma, eliminando componentes ativos adicionais. A pesquisa contribui para o avanço do Green IoT, promovendo sustentabilidade, eficiência energética e monitoramento ambiental robusto.

Palavras-chave: Palavras-chave: RF Energy Harvesting. Metamaterial. IoT. Sensor. SRR.

TITLE: Development of a Wearable FR4 Microwave Sensor for Temperature Tracking

Abstract

The rapid expansion of the Internet of Things (IoT) ecosystem and wearable systems demands innovative energy self-sufficiency mechanisms to mitigate reliance on chemical batteries and reduce the environmental impact of their disposal. Radio Frequency Energy Harvesting (RFEH) technology emerges as a promising alternative, although it faces efficiency challenges due to the instability of ambient electromagnetic

signals. This study aims to design, optimize, and characterize a multifunctional planar microwave sensor based on resonant metasurfaces on a low-cost FR4 substrate, capable of acting simultaneously as an energy harvesting source and a passive transducer for temperature and humidity measurement. The quantitative-experimental methodology begins with a systematic review and meta-analysis. Subsequently, the geometric arrangement—integrating Split-Ring Resonator (SRR) structures and patch antennas—is modeled using Ansys HFSS software to operate near 2.4 GHz, followed by the design of the coupling and rectification circuitry in Keysight ADS. The study expects to validate a reliable calibration curve and demonstrate the feasibility of a fully autonomous planar unit cell, eliminating the need for additional active components. This research contributes to the advancement of Green IoT, promoting sustainability, energy efficiency, and robust environmental monitoring.

Keywords: Keywords: RF Energy Harvesting. Metamaterial. IoT. Sensor. SRR.

Introdução

O crescimento exponencial da Internet das Coisas (IoT), dispositivos wearables e de sensores remotos têm formado uma vasto interesse por soluções de alimenta ções autônomas. O modelo tradicional, baseado em baterias químicas convencionais apresenta certas limitações como a necessidade de manutenção periódica para subs tituição e o impacto ambiental negativo em relação ao descarte de resíduos tóxicos. Dessa forma, a tecnologia de Radio Frequency Energy Harvesting (RFEH) se tornou uma das alternativas mais promissoras, permitindo a captura de ondas eletromagné ticas dispersas no ambiente — provenientes de redes Wi-Fi e torres de telefonia — para conversão em energia elétrica contínua. O estado da arte demonstra que a eficiência desses sistemas é severamente impactada pela instabilidade dos sinais RF em ambientes reais. Um dos principais problemas identificado reside na sensibilidade à polarização e à orientação do sinal recebido. Dessa forma, para contornar esse problema, alguns trabalhos recentes pro põem o uso de antenas patch e Ressonadores de Anel Dividido (SRR) em substratos de baixo custo- principalmente o substrato FR4-, visando estabilizar a tensão de saída convertida (ELSHAEKH et al., 2023) e ainda outras soluções mais complexas como anéis octogonais, que conseguem picos de absorção superiores a 99% em ban das duplas, dessa forma garantindo que o sistema funcione de forma eficiente mesmo em ambientes com alta densidade de sinais (ULLAH et al., 2024). Com o aumento de estudos nessa área, as técnicas de Energy Harvesting es tabelece a base para o avanço em direção à multifuncionalidade integrada. Para que dispositivos IoT operem com uma maior eficácia, é de maior interesse que essas es truturas de captura de energia possam ir além da função única de alimentação con cebendo também capacidades de sensoriamento ambiental. A prática convencional de integrar sensores comerciais ativos enfrenta o desafio do consumo energético resi dual, que muitas vezes excede a potência captada, comprometendo a eficiência global do sistema. No que tange ao sensoriamento, a evolução para sistemas plenamente autônomos encontra no sensoriamento passivo um aliado estratégico, destacando-se o uso de estruturas miniaturizadas do tipo 2.5-D que exploram as propriedades intrín secas dos materiais. Nesse sentido, a variação da permissividade dielétrica do subs trato é utilizada como mecanismo de transdução para medições lineares (DUARTE et al., 2024), transformando a própria base física do dispositivo em um elemento sensor. A integração desta capacidade com os mecanismos de Energy Harvesting em uma única

célula unitária planar representa uma convergência tecnológica que define o estado da arte, permitindo que a estrutura atue simultaneamente como fonte de energia e interface de monitoramento ambiental. Pode-se ainda comentar acerca de possíveis integrações destes modelos de 5 monitoramento do ambiente com Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina em virtude de que todo o sensoriamento atualmente depende de métodos convencionais de pós-processamento dos dados coletados. O objetivo principal deste desenvolvimento reside na capacidade de inovação da transdução sensorial intrínseca à estrutura da antena, eliminando a necessidade de componentes eletrônicos adicionais para medição. Ao utilizar a variação dielétrica do substrato para sensoriamento em uma frequência e a captação de energia em outra, este trabalho possibilita a criação de sensores totalmente passivos, autônomos e de baixo custo, alinhados com as necessidades de sustentabilidade da próxima geração da IoT. Esta pesquisa contribui para a área ao propor o desenvolvimento de uma metassuperfície multifuncional.

Metodologia

3 METODOLOGIA

O substrato base para a antena e o elemento sensor será o composto dielé trico FR4-Epoxy ($\epsilon r \approx 4{,}4$; $\tan\delta \approx 0{,}02$), selecionado por seu baixo custo, facilidade de integração em dispositivos vestíveis e, primordialmente, pela sensibilidade de sua permissividade elétrica às variações de temperatura e umidade. Para os elementos condutores (patch, plano de terra e anéis ressonadores), será utilizado o Cobre (Cop per) comum de condutividade de $5{,}8\times107$ S/m. O software Ansys HFSS será empregado para a modelagem eletromagnética tridimensional e análise de ondas senoidais, enquanto o Keysight ADS será utilizado para o projeto dos circuitos retificadores e simulações de Balanço Harmônico (HB). A validação em bancada utilizará um VNA (Vector Network Analyzer) para medição de parâmetros de reflexão e um Osciloscópio Digital para monitorar a tensão DC de saída.

3.1 Modelagem e Otimização da Antena Base no Ansys HFSS

A primeira fase consiste na concepção geométrica do sensor, utilizando estru turas de Ressonador de Anel Dividido (Split-Ring Resonator- SRR) ou geometrias fractais para garantir a miniaturização necessária para aplicações vestíveis. As di mensões do patch serão calculadas inicialmente via modelo de linha de transmissão para ressonar precisamente em 2,4 GHz. No software HFSS, serão aplicadas condi ções de contorno de radiação e portas de excitação de 50 Ω. O processo de design envolverá uma análise paramétrica rigorosa, ajustando variáveis como o raio do patch e o tamanho das fendas (gaps) para sintonizar a frequência de ressonância exata e otimizar o coeficiente de reflexão ($S11 < -10$ dB). 11

3.2 Co-simulação e Projeto do Retificador no ADS

Nesta etapa, o sensor será simulado para atuar como um transdutor passivo, explorando as propriedades intrínsecas do substrato FR4. Como a permissividade relativa do material varia com o ambiente, o procedimento envolverá a mimetização de mudanças de temperatura (20 ◦C a 120 ◦C) e umidade no Ansys HFSS, alterando manualmente os valores de ϵr do substrato. O objetivo é observar o deslocamento linear da frequência de ressonância em resposta a essas variações dielétricas, esta belecendo uma curva de calibração fidedigna que relacione a frequência de operação com o parâmetro ambiental medido.

3.3 Fabricação e Validação em Bancada

O layout otimizado do sensor planar será fabricado em placa de FR4 via foto litografia ou fresagem por Controle Numérico Computadorizado (CNC). A validação experimental começará com o uso do VNA (Vector Network Analyzer) para confirmar se a frequência de ressonância e a largura de banda medidas coincidem com os mo delos simulados no software Ansys HFSS. Posteriormente, o sensor será submetido a estímulos térmicos e de umidade controlados, utilizando um Osciloscópio Digital para medir a sensibilidade da tensão de saída em tempo real.

Resultados e Discussões

As simulações eletromagnéticas realizadas no software Ansys HFSS para a célula unitária planar demonstraram um comportamento ressonante duplo bem definido nas faixas de alta frequência, apresentando picos de transmissão S21 centrados nas proximidades de 2,41GHz (Vale 1) e 3,38GHz (Vale 2). A varredura paramétrica da permissividade dielétrica do substrato FR4-Epoxy, cobrindo o intervalo de 4,40 a 4,70, revelou uma atenuação acentuada dos parâmetros de transmissão, atingindo níveis de até -21,48dB no primeiro vale e -28,24dB no segundo vale, o que confirma o forte acoplamento capacitivo e o bom desempenho da estrutura ressonante. A análise da resposta sensorial indicou um deslocamento proporcional e regressivo da frequência de ressonância com o aumento da constante dielétrica. No primeiro modo ressonante (Vale 1), ajustou-se uma regressão linear dada pela equação y = -0,199x + 3,3193, com elevado coeficiente de determinação (R^2 = 0,9723), correspondendo a uma sensibilidade individual de 199,0MHz/er. No segundo modo ressonante (Vale 2), obteve-se a equação y = -0,2241x + 4,3752 (R^2 = 0,9674), com sensibilidade de 224,1MHz/er.

Ao combinar os dois modos de ressonância por meio da técnica de soma de sensibilidades, alcançou-se uma sensibilidade total de 423,1MHz/er. Uma vez que a constante dielétrica do substrato FR4-Epoxy varia em função da temperatura, esse deslocamento de frequência acentuado e linear comprova a capacidade do dispositivo de atuar como transdutor térmico passivo. A elevada linearidade observada em ambos os vales assegura alta previsibilidade para a calibração do sensor, mitigando a interferência de ruídos e garantindo resolução adequada para o monitoramento ambiental sem a necessidade de componentes eletrônicos ativos dedicados no elemento transdutor.

Conclusão

Os resultados computacionais obtidos até o momento validam a proposta da metassuperfície ressonante planar em substrato FR4 como uma solução promissora e viável para o ecossistema de Green IoT. A análise dos parâmetros de espalhamento confirmou a existência de modos ressonantes duplos com forte acoplamento e linearidade superior a R^2 = 0,96$ frente às variações da constante dielétrica. A sensibilidade acumulada de 423,1MHz/er atesta formalmente a capacidade preliminar da estrutura para atuar como transdutor de monitoramento de temperatura, aproveitando a variação térmica intrínseca do substrato. Por se tratar de um projeto em andamento, os

trabalhos futuros concentram-se na integração circuital para RF Energy Harvesting (RFEH) via Keysight ADS, seguida pela fabricação física do protótipo e pela validação experimental em câmara térmica com Analisador Vetorial de Redes (VNA), consolidando o protótipo autônomo e multifuncional.

Referências

ABDULWALI, Z. S. A. et al. A High-Performance Circularly Polarized and Harmonic Rejection Rectenna for Electromagnetic Energy Harvesting. Sensors, v. 23, n. 18, p. 7725, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/s23187725[cite: 2]

ALDIN, H. N. S. et al. A comprehensive review of energy harvesting and routing strategies for IoT sensors sustainability. Sensors International, v. 5, p. 100258, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sintl.2023.100258[cite: 2]

ARGOTE-AGUILAR, J. et al. Wide Power Range RF Energy Harvester for Powering Ultralow-Power Devices. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v. 72, n. 10, p. 5632-5645, 2024. DOI: https://doi.org/10.1109/TMTT.2024.3397389[cite: 2]

BAIRAPPAKA, S. K. et al. A Novel Design of Broadband Circularly Polarized Rectenna With Enhanced Gain. IEEE Access, v. 12, p. 65582-65594, 2024. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3397016[cite: 2]

BAKYTBEKOV, A. et al. Synergistic multi-source ambient RF and thermal energy harvester for green IoT applications. Energy Reports, v. 9, p. 1875-1885, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.027[cite: 2]

DOUHI, S. et al. Design of a Flexible Rectangular Antenna Array with High Gain for RF Energy Harvesting and Wearable Devices. Journal of Nano- and Electronic Physics, v. 15, n. 3, p. 03010, 2023. DOI: https://doi.org/10.21272/jnep.15(3).03010[cite: 2]

DUARTE, M. J. et al. A novel ultra-miniaturized 2.5-D frequency selective surface temperature sensor. Sensors and Actuators A: Physical, v. 378, p. 115763, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115763[cite: 2]

ELSHAEKH, D. N. et al. Printed circularly polarized spilt ring resonator monopole antenna for energy harvesting. Ain Shams Engineering Journal, v. 14, p. 102182, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102182[cite: 2]

EN-NAGHMA, W. et al. New circularly polarized microstrip patch antenna array design for energy harvesting applications. E3S Web of Conferences, v. 469, p. 00009, 2023. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346900009[cite: 2]

EN-NAGHMA, W. et al. Analysis, design, and optimization based on genetic algorithms of a highly efficient dual-band rectenna system. Results in Engineering, v. 23, p. 102739, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102739[cite: 2]

HALIMI, M. A. et al. Multi-Band Microwave Rectifiers for RF Energy Harvesting: A Comprehensive Review. IEEE Access, v. 13, p. 140061-140078, 2025. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3597133[cite: 2]

JAMIL, M. N. B. M. et al. Rectenna System Development Using Harmonic Balance and S-Parameters. Sensors, v. 24, n. 9, p. 2843, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/s24092843[cite: 2]

JUSOH, A. Z. et al. Design of Miniaturized Antenna for IoT Applications Using Metamaterial. IIUM Engineering Journal, v. 24, n. 1, 2023. DOI: https://doi.org/10.31436/iiumej.v24i1.2505[cite: 2]

MAHENGE, E. et al. Radio Frequency Energy Harvesting for Underground Sensor Nodes. IEEE Access, v. 12, p. 43770-43788, 2024. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380372[cite: 2]

OLAIMAT, M. M. et al. Simulation and optimization of rectenna systems. Scientific Reports, v. 13, p. 10839, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-44401-2[cite: 2]

PECUNIA, V. et al. Roadmap on printable electronics for next-generation sensors. Journal of Physics: Materials, v. 6, n. 4, p. 042501, 2023. DOI: https://doi.org/10.1088/2515-7639/acc550[cite: 2]

ROSALINE, I. et al. Design and optimization of a miniaturized dual band rectenna. Results in Engineering, v. 22, p. 102199, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102199[cite: 2]

ULLAH, N. et al. A compact complementary split ring resonator (CSRR) based perfect metamaterial absorber. Engineering Science and Technology, v. 45, p. 101473, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101473[cite: 2]

ULLAH, N. et al. Design and experimental validation of a compact dual-band metamaterial perfect absorber. Optical Materials, v. 157, p. 116054, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116054[cite: 2]

WANG, B. et al. Design and Research of Temperature Sensor Based on Single Split Ring Resonator. In: Proc. of 2023 International Conference on Information Technology (ICIT), 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/ICIT58056.2023.10226143[cite: 2]

CÓDIGO: ET0931

AUTOR: VINICIUS WALLACE REBOUCAS SILVA

ORIENTADOR: GABRIEL IVAN MEDINA TAPIA

TÍTULO: CARACTERIZAÇÃO DO VENTO COSTEIRO E OFFSHORE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Resumo

A matriz energética brasileira destaca-se pela elevada participação de fontes renováveis, com a energia eólica desempenhando papel estratégico no cenário nacional. Nesse contexto, o monitoramento dos recursos eólicos costeiros é fundamental para o planejamento e a expansão do setor. Este estudo avaliou o potencial e caracterizou a variabilidade temporal e espacial do vento na costa de Natal-RN. Foram utilizados dados de velocidade e direção do vento obtidos por uma estação anemométrica do INPE entre 2016 e 2022. Após procedimentos de controle de qualidade e tratamento dos dados, os registros foram extrapolados para a altura típica de operação de aerogeradores. Complementarmente, dados satelitais de velocidade do vento foram empregados para ampliar a análise espacial do recurso eólico, sendo aplicado o algoritmo K-means para identificar regiões com padrões semelhantes de vento. As análises foram realizadas na linguagem Python. Os resultados evidenciaram uma marcada variabilidade sazonal, com períodos de maior e menor intensidade dos ventos ao longo do ano, além de um ciclo diário caracterizado pelo aumento da velocidade durante o dia e redução no período noturno. Os agrupamentos obtidos permitiram identificar áreas com características eólicas distintas. Conclui-se que a região apresenta elevado potencial eólico, destacando-se como área promissora para futuros empreendimentos e estudos de aproveitamento energético.

Palavras-chave: Energia eólica; offshore; computação numérica

TITLE: CHARACTERIZATION OF OFFSHORE COASTAL WIND THROUGH NUMERICAL SIMULATION IN THE STATE OF RIO GRANDE DO NORTE

Abstract

The Brazilian energy matrix stands out for its high share of renewable sources, with wind energy playing a strategic role in the national energy sector. In this context, monitoring coastal wind resources is essential for the planning and expansion of the industry. This study assessed the wind energy potential and characterized the temporal and spatial variability of wind along the coast of Natal, Rio Grande do Norte, Brazil. Wind speed and direction data collected by an anemometric station operated by the National Institute for Space Research (INPE) between 2016 and 2022 were analyzed. After quality control and data processing procedures, the measurements were extrapolated to the typical hub height of wind turbines. Additionally, satellite-derived wind speed data were employed to extend the spatial assessment of the wind resource, and the K-means clustering algorithm was applied to identify regions with similar wind patterns. All analyses were performed using the Python programming language. The results revealed marked seasonal variability, with periods of higher and lower wind intensity throughout the year, as well as a daily cycle characterized by increased wind speeds during daytime and reduced speeds at night. The clustering analysis identified areas with distinct wind characteristics. The findings indicate that the region has significant wind energy potential, highlighting its suitability for future energy development projects and further resource assessment studies.

Keywords: Wind energy; offshore; numerical computing

Introdução

Matriz energética brasileira destaca-se pela elevada participação de fontes renováveis, consolidando-se como uma das menos intensivas em carbono no cenário global. Historicamente, a oferta interna de energia provém, majoritariamente, do setor hidrelétrico, que aproveita o potencial hídrico das bacias dos rios nas regiões Norte e Centro-Oeste. Contudo, o país tem diversificado sua matriz mediante investimentos em energia solar, biomassa e, notadamente, eólica. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), a matriz nacional é significativamente mais renovável que a média mundial; em 2023, essas fontes representaram 49,1% da Oferta Interna de Energia (OIE), com contribuições expressivas da geração eólica, solar e de biomassa. Nesse panorama, a fonte eólica emerge como alternativa estratégica, com o Brasil ocupando a sexta posição no ranking mundial de capacidade instalada do Global Wind Energy Council (GWEC, 2024). Estima-se que o potencial eólico nacional alcance 700 GW (ABEEÓLICA, 2024).

Enquanto a tecnologia onshore (em terra) encontra-se consolidada, a saturação de áreas ideais tem impulsionado o interesse pela geração offshore (no mar). Embora apresente maior complexidade técnica e custos elevados, a modalidade offshore oferece maior capacidade de geração, menor impacto visual e ventos mais constantes e intensos. De acordo com o GWEC (2024), a capacidade instalada mundial superou 68 GW em 2023, com projeções de adições anuais de 34 GW até 2030. O mercado global sinaliza uma valorização acentuada, com estimativas de crescimento de US$ 56 bilhões em 2024 para US$ 299 bilhões até 2034 (GLOBAL MARKET INSIGHTS, 2025).

A transição para a energia eólica offshore, todavia, impõe desafios científicos, como a compreensão das interações multiescala entre oceano e atmosfera e o controle operacional de turbinas de grande porte (VEERS et al., 2022). No Brasil, os dados sobre o potencial marítimo ainda são incipientes. Estudos da EPE (2019) estimam um potencial de 57 GW em até 10 km da costa. Dados do satélite QuikSCAT indicam que o recurso eólico na Zona Econômica Exclusiva (ZEE) brasileira pode ser doze vezes superior ao terrestre, destacando-se o litoral do Rio Grande do Norte pelas elevadas velocidades de vento registradas (ORTIZ; KAMPEL, 2011).

Para a caracterização desse recurso, torres anemométricas são fundamentais no monitoramento das variáveis atmosféricas e na validação de modelos numéricos. Essas estruturas, com alturas entre 10 e 120 metros, são equipadas com anemômetros (velocidade) e wind vanes (direção), além de sensores de temperatura, umidade e pressão. No Brasil, essas redes de monitoramento são essenciais para validar modelos de mesoescala, como o Weather Research and Forecasting (WRF). A integração entre dados observacionais e modelagem numérica é crucial para aumentar a precisão das simulações atmosféricas. Complementarmente às observações in situ, o uso de reanálises globais, como o ERA5 do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), processadas via ferramentas computacionais como Python, permite uma análise abrangente da variabilidade temporal e espacial do vento, preenchendo lacunas de dados em regiões sem monitoramento direto.

Metodologia

análise do potencial eólico deste estudo concentrou-se no estado do Rio Grande do Norte, região estratégica que lidera a indústria eólica nacional (ABEEÓLICA, 2021). Para fins de geração de energia em larga escala, considera-se a altura de 50 metros como um patamar referencial para a coleta de dados de velocidade do vento. Contudo, devido à disponibilidade de registros históricos, utilizou-se a base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020), que disponibiliza medições anemométricas a 10 metros de altura para a região de Natal-RN.

Visando adequar esses dados às altitudes de operação das turbinas, aplicou-se a lei do perfil logarítmico do vento para a extrapolação vertical da velocidade de 10 m para 50 m. Esta metodologia fundamenta-se na representação do perfil de velocidades dentro da camada limite atmosférica, sendo considerada uma aproximação robusta para alturas inferiores a 100 m ao incorporar a rugosidade superficial do terreno z_0 (HAU, 2013). O procedimento de cálculo, detalhado na Equação (1), permite determinar a velocidade v_2 em uma altura h_2 a partir de uma referência conhecida (v_1, h_1). Ressalta-se que essa técnica de extrapolação é amplamente aceita na literatura, tendo sido empregada, por exemplo, por Neiva et al. (2017) na elaboração do Atlas Brasileiro de Potencial Eólico.

Complementarmente, a primeira etapa do estudo consistiu na obtenção de dados observacionais referentes ao período entre 2016 e 2022. As medições de velocidade e direção do vento foram registradas por um anemômetro ultrassônico 2D, instalado em torres de monitoramento do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), situadas

nas proximidades da costa de Natal (Figura 1). A alta resolução temporal e a continuidade desses registros viabilizam uma análise detalhada do comportamento eólico local. Previamente à análise, as séries temporais passaram por um protocolo de pré-tratamento, que compreendeu a identificação de inconsistências, a remoção de outliers e o preenchimento de lacunas, garantindo a integridade dos dados utilizados nas validações subsequentes.

Resultados e Discussões

Os resultados apresentados referem-se às velocidades do vento com relação ao tempo. O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho e o comportamento do vento durante os diferentes períodos do ano, com foco na análise da variabilidade da intensidade do vento ao longo desse período. Além disso, busca-se investigar como o vento se comporta em diferentes momentos do dia, permitindo uma compreensão mais detalhada do seu comportamento.

Para a obtenção dos gráficos, foram calculadas as médias diárias ao longo de cada mês do ano, com o objetivo de representar a variação horária da velocidade do vento ao longo de um dia típico. As Figuras 3 á 6 ilustram o comportamento dos ciclos diários médios, com base nos dados coletados pela torre anemométrica. Foram destacados os meses de abril e maio, por apresentarem as menores intensidades de vento, e os meses de agosto e setembro, por registrarem as maiores intensidades. Esses períodos foram selecionados por evidenciarem características distintas e representativas da variabilidade sazonal.

Ao analisar as médias diárias, observa-se que o mês de maio (Figura 4) apresentou os menores valores de velocidade do vento, com média de 7,15 m/s e picos de até 12,32 m/s. Em contraste, os meses de agosto e setembro (Figuras 6 e 7 respectivamente) exibiram as maiores intensidades, com velocidades mínimas em torno de 8,43 m/s e máximas que chegaram a 14,36 m/s, demonstrando maior regularidade e intensidade do recurso eólico nesse período.

Observa-se um padrão diário recorrente na velocidade do vento ao longo de todos os meses analisados. A partir das 10:00 horas, a intensidade dos ventos começa a aumentar gradualmente, indicando o início de um período de maior movimentação atmosférica. Esse aumento se mantém até atingir o pico entre 14:00 e 16:00 horas, quando as velocidades registradas tendem a ser as mais elevadas do dia. Após esse intervalo, ocorre uma redução progressiva na velocidade dos ventos, que continua até o início da noite. Esse comportamento sugere a existência de um ciclo diurno bem definido, com períodos específicos de maior e menor intensidade, sendo um fator crucial para a previsão e o aproveitamento eficiente do recurso eólico ao longo do dia.

Após a análise da sazonalidade e das periodicidades dos ventos na região costeira do Rio Grande do Norte, torna-se fundamental estender o estudo para a região offshore. Diante da relativa escassez de dados medidos diretamente no mar, os dados de reanálise do satélite ERA5 desempenharam um papel crucial nesta pesquisa, apresentando resultados coerentes com os testes realizados a partir da torre anemométrica.

No que diz respeito à dinâmica local, a brisa marítima manifesta-se por ventos que fluem do oceano para a costa em baixos níveis (representados em azul), acompanhados por um fluxo de retorno orientado da terra para o mar em altos níveis (representados em vermelho). No mês de setembro, foram observados padrões de alta intensidade e constância na região costeira (Figura 7 A); nesse período, a intensidade do vento tende a abranger uma área de atuação maior quando comparada às demais regiões.

Em contrapartida, a análise para a estação do verão, representada pelo mês de dezembro (Figura 7 B), indicou um comportamento mais brando, caracterizado por menores intensidades e maior dispersão dos ventos. O mês de maio, correspondente ao outono, registrou os menores índices de intensidade de todo o período avaliado. Finalizando o ciclo sazonal com a estação do inverno, o mês de julho apresentou um aumento na velocidade dos ventos; dado que esse período precede a transição para os meses de maior intensidade, julho pode ser considerado um intervalo de preparação atmosférica para a estação subsequente.

Conclusão

A análise da dinâmica atmosférica no litoral do Rio Grande do Norte ratificou a presença de um padrão diurno persistente na evolução do vento, caracterizado por picos de intensidade no período da tarde, impulsionados pela amplificação do gradiente térmico continente-oceano. No âmbito sazonal, identificou-se uma marcada variabilidade temporal, na qual os meses de fevereiro a maio (período de influência da Zona de Convergência Intertropical) registram as menores velocidades médias, enquanto o trimestre de agosto a outubro (fase de máxima intensificação dos ventos alísios) apresenta os maiores níveis de magnitude e regularidade eólica, destacando-se o mês de setembro.

A aplicação do algoritmo K-means mostrou-se uma ferramenta eficaz para a segmentação espacial e a redução da complexidade de cenários cronológicos, viabilizando a definição de perfis representativos de velocidade e direção para cada cluster. Esse mapeamento fornece subsídios fundamentais para a análise de complementaridade energética e para a escolha otimizada de sítios voltados à implantação de parques eólicos onshore e offshore, reduzindo as incertezas associadas à intermitência da fonte na rede elétrica.

Conclui-se que os resultados obtidos possuem aplicabilidade prática direta no planejamento e na operação de sistemas eólicos regionais. A previsibilidade do ciclo diurno favorece o despacho otimizado de energia nos horários de maior demanda, enquanto a caracterização da sazonalidade aponta para a necessidade de estratégias operacionais customizadas ao longo do ano, consolidando o uso de ferramentas computacionais e dados de reanálise como suporte indispensável à transição energética no Estado.

Referências

ABEEÓLICA. O setor eólico no Brasil. Associação Brasileira de Energia Eólica, 2022. Disponível em: https://abeeolica.org.br/energia-eolica/o-setor/. Acesso em: 09 jun. 2025.

BLACKWOOD, M.; GRINSHPAN, A.; SCOTT, C. Maximum efficiency of a wind turbine. 2016. Disponível em: https://doi.org/10.5038/2326-3652.6.2.4865. Acesso em: 10 jun. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional 2020. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Brazilian Energy Balance 2020 – Year 2019.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Matriz energética e elétrica. 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica. Acesso em: 10 jun. 2025.

GLOBAL MARKET INSIGHTS. Offshore wind energy market size, share and trends analysis. 2025. Disponível em: http://gminsights.com/industry-analysis/offshore-wind-energy-market. Acesso em: 10 jun. 2025.

GWEC – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Wind industry installs record capacity in 2024 despite policy instability. 2024. Disponível em: https://www.gwec.net. Acesso em: 10 jun. 2025.

MIRAFTABZADEH, S. M.; COLOMBO, C. G.; LONGO, M.; FOIADELLI, F. K-Means and alternative clustering methods in modern power systems. IEEE Access, v. 11, p. 119596–119633, 2023.

MOSSETTI, G.; POLONI, C.; DIVIACCO, B. Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S. l.], v. 51, n. 1, p. 105–116, 1994. DOI: 10.1016/0167-6105(94)90080-9. Disponível em: ScienceDirect. Acesso em: 22 maio 2026.

ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. In: V Simpósio Brasileiro de Oceanografia, Santos, 2011.

SAINT-DRÉNAN, Y.; BESSEAU, R.; JANSEN, M.; STAFFELL, I.; TROCCOLI, A.; DUBUS, L.; SCHMIDT, J.; GRUBER, K.; SIMOES, S.; HEIER, S. A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions. Renewable Energy, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.123.

SILVA, A. R.; PIMENTA, F. M.; ASSIREU, A. T.; SPYRIDES, M. H. C. Complementarity of Brazil's hydro and offshore wind power. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 56, p. 413–427, 2016.

VEERS, P. et al. Grand Challenges: Wind energy research needs for a global energy transition. Wind Energy Science Discussions, p. 1–8, 2022. DOI: 10.5194/wes-2022-66.

WU, W.; PENG, M. A Data Mining Approach Combining K-Means Clustering With Bagging Neural Network for Short-Term Wind Power Forecasting. IEEE Internet of Things Journal, v. 4, p. 979–986, 2017. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2677578.

Anexos



Figura 2: Metodologia de Análise dos Dados de Velocidade do Vento. Fonte: Autoria própria



Figura 3. Velocidade do vento do mês de abril. Fonte: Autoria própria



Figura 4. Velocidade do vento do mês de maio. Fonte: Autoria própria



Figura 5. Velocidades do vento do mês de agosto. Fonte: Autoria própria



Figura 6. Velocidades do vento do mês de setembro. Fonte: Autoria própria



Figura 7. Velocidade do vento dos meses de A) Setembro, B) Dezembro, C) Maio, D) Julho. Fonte: Autoria própria



Figura 1. Imagem do sensor acoplado à torre de monitoramento. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe, 2025).

CÓDIGO: ET0934

AUTOR: ROSELIA NASCIMENTO DA SILVA

COAUTOR: LUIZ AFFONSO HENDERSON GUEDES DE OLIVEIRA

COAUTOR: LUCAS TORRES MARQUES

ORIENTADOR: TIAGO TAVARES LEITE BARROS

TÍTULO: Aplicação da Arquitetura XNet com Ativação Cauchy no Traçamento de Raios Sísmicos

Resumo

O traçamento de raios sísmicos é importante para a caracterização do subsolo, mas sua resolução por métodos numéricos pode apresentar elevado custo computacional em modelos geológicos complexos. Redes neurais profundas podem acelerar esse processo ao aprender o mapeamento entre as condições iniciais dos raios e seu estado durante a propagação. Este trabalho investiga a aplicação da arquitetura XNet, baseada em neurônios com função de ativação racional Cauchy, ao traçamento de raios sísmicos. Embora funções tradicionais, como a ReLU (Rectified Linear Unit), apresentem excelente desempenho em tarefas gerais de classificação e regressão, problemas físicos como o traçamento de raios sísmicos envolvem relações complexas e altamente não lineares associadas às propriedades do meio geológico. Assim, investiga-se se uma função de ativação mais flexível pode representar essas relações de maneira mais adequada. Foi realizado um estudo comparativo entre uma MLP com ReLU e uma XNet com ativação Cauchy, mantendo a mesma estrutura de rede. Os experimentos utilizaram trajetórias simuladas no modelo acústico Marmousi. A XNet apresentou R^2 superior a 0,999 para todas as variáveis avaliadas e reduziu o MAPE em aproximadamente três vezes em relação à MLP. Os resultados indicam o potencial da XNet para acelerar o problema direto de traçamento de raios sísmicos.

Palavras-chave: Traçamento sísmico. Redes neurais. XNet. Ativação Cauchy.

TITLE: Application of the XNet Architecture with Cauchy Activation to Seismic Ray Tracing

Abstract

Seismic ray tracing is important for subsurface characterization, but its solution using numerical methods can be computationally expensive, particularly for complex geological models. Deep neural networks can accelerate this process by learning the mapping between initial ray conditions and their propagated state. This work investigates the application of the XNet architecture, based on neurons with a rational Cauchy activation function, to seismic ray tracing. Although traditional functions such as ReLU (Rectified Linear Unit) provide excellent performance in general classification and regression tasks, physical problems such as seismic ray tracing involve complex and highly nonlinear relationships associated with geological properties. Therefore, this study investigates whether a more flexible activation function can represent these relationships more adequately. A comparative study was conducted between an MLP using ReLU and an XNet using Cauchy activation, with the same network structure. Experiments used simulated trajectories from the Marmousi acoustic model. XNet achieved R^2 values above 0.999 for all evaluated variables and reduced MAPE by approximately threefold compared with the MLP. The results indicate the potential of XNet to accelerate the seismic ray tracing forward problem.

Keywords: Seismic ray tracing. Neural networks. XNet. Cauchy activation.

Introdução

O traçamento de raios sísmicos é uma etapa fundamental em aplicações de geofísica computacional, sendo utilizado em procedimentos como migração e tomografia sísmica. Tradicionalmente, o problema é resolvido por meio da solução numérica iterativa de equações diferenciais, o que pode apresentar elevado custo computacional quando aplicado a modelos de velocidade com estruturas geológicas complexas (Cervený, 2001). Nesse contexto, métodos baseados em aprendizado de máquina podem ser utilizados para aproximar o mapeamento entre as condições iniciais de propagação e o estado do raio, possibilitando previsões de forma mais rápida.

As redes neurais profundas têm sido amplamente utilizadas em diferentes aplicações devido à sua capacidade de modelar relações complexas entre dados. Em problemas físicos, essas técnicas também têm sido investigadas como alternativas para aproximar soluções de modelos governados por equações diferenciais (Raissi et al., 2019). Nesse contexto, funções de ativação tradicionais, como a ReLU (Rectified Linear Unit), apresentam excelente desempenho em tarefas gerais de classificação e regressão. Entretanto, problemas físicos como o traçamento de raios sísmicos envolvem relações complexas e altamente não lineares associadas às variações das propriedades do meio geológico. Dessa forma, torna-se relevante investigar se funções de ativação mais flexíveis podem representar essas relações de maneira mais adequada.

Entre essas alternativas, a arquitetura XNet propõe a utilização de neurônios baseados em funções racionais, especificamente uma função de ativação Cauchy parametrizada (Li et al., 2025). Essa formulação introduz parâmetros treináveis na função de ativação, permitindo que seu comportamento seja ajustado durante o treinamento da rede.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo investigar o desempenho da arquitetura XNet com ativação Cauchy no traçamento de raios sísmicos, comparando-a com uma rede Multilayer Perceptron (MLP) convencional com ativação ReLU. A comparação é realizada mantendo-se a mesma estrutura de rede, de modo a avaliar o impacto da função de ativação sobre a capacidade de predição.

Metodologia

Foi desenvolvido um experimento controlado para comparar duas arquiteturas de redes neurais aplicadas ao traçamento de raios sísmicos: uma Multilayer Perceptron (MLP) convencional, utilizada como modelo de referência, e uma arquitetura XNet com função de ativação racional Cauchy. As duas redes foram configuradas com a mesma profundidade e largura, diferindo principalmente quanto à função de ativação e à inicialização dos pesos.

Os dados utilizados correspondem a trajetórias sísmicas simuladas sobre o modelo acústico Marmousi, reconhecido por apresentar elevada complexidade estrutural. Para cada trajetória, a rede recebe quatro variáveis de entrada que representam as condições iniciais do raio: posição inicial nas coordenadas $\boldsymbol{x0}$ e $\boldsymbol{z0}$, ângulo de lançamento $\boldsymbol{\theta 0}$ e tempo de propagação $\boldsymbol{t}$.

A partir dessas informações, as redes são utilizadas para prever quatro variáveis de saída associadas ao estado do raio: posição atual $\boldsymbol{x}$ e $\boldsymbol{z}$ e componentes do vetor de vagarosidade $\boldsymbol{px}$ e $\boldsymbol{pz}$. Antes do treinamento, as grandezas físicas foram padronizadas para média zero e variância unitária, buscando melhorar a estabilidade numérica durante a otimização. Uma parcela dos dados foi separada para a realização de um teste cego, contendo condições iniciais não utilizadas no treinamento.

A rede MLP utilizada como modelo de controle possui quatro camadas ocultas, com 64 neurônios em cada camada, utilizando a função de ativação ReLU e inicialização de pesos Kaiming. A arquitetura XNet mantém exatamente a mesma profundidade e largura, substituindo a ReLU pela função racional Cauchy e utilizando inicialização Xavier.

A função de ativação Cauchy utilizada pela XNet é definida pela expressão apresentada na Equação 1. Essa formulação introduz três parâmetros treináveis, $\boldsymbol{\lambda 1}$, $\boldsymbol{\lambda 2}$ e $\boldsymbol{d}$, que são

otimizados conjuntamente com os pesos da rede durante o processo de retropropagação. A representação gráfica dos termos da função de ativação é apresentada na Figura 1.

Para ambas as arquiteturas, foi utilizada a função de perda Mean Squared Error (MSE) e o otimizador Adam, com taxa de aprendizado de 0,001. O treinamento foi realizado durante 100 épocas. O desempenho dos modelos foi avaliado no conjunto de teste por meio do coeficiente de determinação R^2 e do Mean Absolute Percentage Error (MAPE).

Resultados e Discussões

A análise dos resultados iniciou-se pela avaliação da dinâmica de treinamento das duas arquiteturas. As curvas de perda MSE obtidas durante as 100 épocas de treinamento são apresentadas na Figura 2, permitindo comparar o comportamento do modelo MLP com ReLU e da arquitetura XNet com ativação Cauchy.

Conforme observado na Figura 2(a), o modelo MLP apresenta uma redução inicial da perda de treinamento, seguida de uma estabilização em um patamar de erro mais elevado. A perda de validação também apresenta oscilações ao longo do treinamento, mantendo-se acima da perda de treinamento. Em contraste, a Figura 2(b) mostra que a XNet apresenta redução mais consistente da perda de treinamento, atingindo valores finais inferiores aos observados para a MLP. A perda de validação também permanece em um patamar inferior ao da MLP, apesar das oscilações observadas durante o treinamento.

Esse comportamento indica que a utilização da função de ativação Cauchy pode proporcionar maior flexibilidade para a representação das relações presentes no problema de traçamento de raios sísmicos. Os parâmetros treináveis da função são ajustados durante o processo de otimização, permitindo uma adaptação mais específica às características dos dados.

Para avaliar quantitativamente o desempenho dos modelos, foi utilizado um conjunto de teste contendo novas condições iniciais de propagação dos raios. Os resultados obtidos para as variáveis de posição e para as componentes do vetor de vagarosidade são apresentados na Tabela 1.

Conforme apresentado na Tabela 1, a XNet apresentou valores de R^2 superiores a 0,999 para todas as variáveis analisadas. Para a coordenada $\boldsymbol{x}$, foram obtidos $R^2 = 0{,}999970$ para

a XNet e $R^2 = 0,999882$ para a MLP. Para a coordenada $\boldsymbol{z}$, os valores foram 0,999966 e 0,999759, respectivamente. Para $\boldsymbol{p}x$, a XNet atingiu 0,999902, enquanto a MLP apresentou 0,999035. Finalmente, para $\boldsymbol{p}z$, foram obtidos 0,999903 para a XNet e 0,999188 para a MLP.

Os resultados de MAPE reforçam a diferença de desempenho entre os modelos. Para a variável $\boldsymbol{x}$, a XNet apresentou MAPE de 0,045832, contra 0,096414 da MLP. Para $\boldsymbol{z}$, os valores foram 0,100305 e 0,342931, respectivamente. Na variável $\boldsymbol{p}x$, a XNet obteve 0,086834, enquanto a MLP apresentou 0,279572. Para $\boldsymbol{p}z$, os valores foram 0,265329 para a XNet e 0,753487 para a MLP.

De maneira geral, observa-se que a utilização da ativação Cauchy reduziu substancialmente os erros de predição em comparação com a MLP. Considerando os resultados apresentados na Tabela 1, a XNet apresentou redução do MAPE em aproximadamente três vezes em relação ao modelo de referência.

Na escala física do problema, essa melhoria também se refletiu na incerteza associada à profundidade. O erro em $\boldsymbol{z}$, que era próximo de 4,0 metros na MLP tradicional, foi reduzido para aproximadamente 1,3 metro na XNet.

Conclusão

Este trabalho investigou a aplicação da arquitetura XNet com função de ativação Cauchy ao traçamento de raios sísmicos, utilizando o modelo acústico Marmousi e comparando seu desempenho com uma rede MLP convencional com ativação ReLU.

Os resultados demonstraram que a XNet apresentou desempenho superior ao modelo de referência, alcançando valores de R^2 superiores a 0,999 para todas as variáveis avaliadas e reduzindo o MAPE em aproximadamente três vezes. A manutenção da mesma profundidade e largura nas duas redes evidencia que a substituição da função de ativação foi capaz de produzir ganhos relevantes na capacidade preditiva.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram o potencial da arquitetura XNet para a aplicação em problemas de geofísica computacional que envolvem relações complexas, indicando que funções de ativação parametrizadas podem ser uma alternativa promissora para a aproximação de trajetórias sísmicas. Como trabalhos futuros, pretende-se

investigar a abordagem em diferentes modelos geológicos e condições de propagação, além de avaliar estratégias adicionais de treinamento e incorporação de informações físicas ao processo de aprendizagem.

Referências

ČERVENÝ, V. Seismic Ray Theory. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

LI, X.; XIA, Z.; ZHANG, H. Cauchy activation function and XNet. Neural Networks, v. 188, p. 107375, 2025. DOI: 10.1016/j.neunet.2025.107375.

RAISSI, M.; PERDIKARIS, P.; KARNIADAKIS, G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. Journal of Computational Physics, v. 378, p. 686–707, 2019. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.10.045.

Anexos



Equação 1 - Função de ativação Cauchy parametrizada utilizada na arquitetura XNet.



Figura 1 - Representação gráfica dos termos da função de ativação Cauchy parametrizada utilizada na arquitetura XNet.



Figura 2(a) - Modelo MLP com ativação ReLU.



Figura 2(b) - Arquitetura XNet com ativação Cauchy.



Tabela 1 - Comparação do desempenho preditivo entre XNet e MLP utilizando as métricas R^2 e MAPE.

CÓDIGO: ET0937

AUTOR: CRISLAINE BEATRIZ GUEDES DA SILVA

ORIENTADOR: THERCIO HENRIQUE DE CARVALHO COSTA

TÍTULO: Estudo da deposição de filmes finos de ZnS via CDB para aplicação em células fotovoltaicas

Resumo

Os materiais semicondutores com características para aplicações fotovoltaicas são alternativas ambientalmente mais favoráveis aos materiais tradicionalmente utilizados como camada buffer em células solares de filmes finos. Diante disso, o sulfeto de zinco (ZnS) apresenta propriedades ópticas e eletrônicas ideais, incluindo elevado band gap e elevada transmitância na região do visível, tornando-o adequado para essa aplicação. Este trabalho tem como objetivo estudar a deposição de filmes finos de ZnS pela técnica de Deposição em CBD, avaliando a influência dos principais parâmetros de deposição sobre a formação, uniformidade e propriedades dos filmes. A rota química empregada utiliza cloreto de zinco como precursor de Zn^{2+}, tioureia como fonte de enxofre, citrato de sódio como agente complexante e hidróxido de amônio (NH_4OH) para controle do pH. Entre os parâmetros investigados estão a concentração dos reagentes, o pH, a temperatura e o tempo de deposição. As condições de concentração seguem, como referência experimental, a proporção 1:3:10 entre cloreto de zinco, citrato de sódio e tioureia, respectivamente. O controle desses parâmetros busca favorecer uma deposição mais lenta e controlada, reduzindo a precipitação de fases indesejadas, como óxido de zinco, e favorecendo o crescimento do ZnS sobre o substrato. Os filmes são caracterizados por técnicas DRX, MEV-EDS e determinação da energia de band gap, com os melhores resultados aplica-se como camada buffer nos dispositivos.

Palavras-chave: ZnS; filmes finos; CDB; DRX; MEV-EDS; células fotovoltaicas; band gap

TITLE: Study of ZnS thin-film deposition via CBD for application in photovoltaic cells

Abstract

Semiconductor materials suitable for photovoltaic applications offer an environmentally more favorable alternative to the materials traditionally used as buffer layers in thin-film solar cells. In this context, zinc sulfide (ZnS) exhibits ideal optical and electronic properties—including a wide band gap and high visible-light transmittance—making it well-suited for this application. This study aims to investigate the deposition of ZnS thin

films using the Chemical Bath Deposition (CBD) technique, evaluating how key deposition parameters influence film formation, uniformity, and properties. The chemical route employed uses zinc chloride as the Zn^{2+} precursor, thiourea as the sulfur source, sodium citrate as a complexing agent, and ammonium hydroxide (NH_4OH) for pH control. The parameters investigated include reagent concentration, pH, temperature, and deposition time. Regarding concentration, the experimental reference follows a 1:3:10 ratio of zinc chloride, sodium citrate, and thiourea, respectively. Controlling these parameters aims to promote slower, more controlled deposition, thereby reducing the precipitation of unwanted phases (such as zinc oxide) and favoring ZnS growth on the substrate. The films are characterized using XRD, SEM-EDS, and band gap energy determination; the best-performing films are then applied as buffer layers in the devices.

Keywords: ZnS; thin films; CBD; XRD; SEM-EDS; photovoltaic cells; band gap

Introdução

A crescente demanda por fontes de energia renováveis tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias para geração de eletricidade a partir de fontes limpas e abundantes. Entre essas tecnologias, a energia solar fotovoltaica apresenta grande importância devido à possibilidade de conversão direta da radiação solar em energia elétrica. Nesse contexto, o desenvolvimento de células solares de filmes finos tem recebido atenção devido à possibilidade de utilização de menores quantidades de material e à capacidade de fabricação de dispositivos sobre diferentes tipos de substratos. As células fotovoltaicas de filmes finos são constituídas por diferentes camadas com funções específicas. Entre elas, a camada buffer desempenha um papel importante na formação da interface entre o material absorvedor e as demais camadas do dispositivo. Tradicionalmente, o sulfeto de cádmio (CdS) tem sido utilizado como camada buffer em diferentes estruturas fotovoltaicas. Entretanto, sua toxicidade motiva a busca por materiais alternativos ambientalmente mais favoráveis. O sulfeto de zinco (ZnS) é um semicondutor do grupo II-VI que apresenta elevado band gap, geralmente situado aproximadamente entre 3,5 e 3,9 eV, além de elevada transmitância na região visível. Essas características tornam o ZnS um candidato promissor para aplicações em dispositivos fotovoltaicos, incluindo sua utilização como camada buffer em células solares de filmes finos. Entre as diferentes técnicas disponíveis para a produção de filmes finos de ZnS, a Deposição em Banho Químico, conhecida pela sigla CBD (Chemical Bath Deposition), apresenta vantagens relacionadas à simplicidade experimental, baixo custo, baixo consumo energético e possibilidade de deposição sobre áreas relativamente grandes. A técnica também permite controlar as propriedades do filme por meio da alteração de parâmetros como concentração dos reagentes, pH, temperatura, tempo de deposição e utilização de agentes complexantes. Na deposição por CBD, a formação do ZnS ocorre a partir da disponibilização controlada dos íons Zn^{2+} e das espécies contendo enxofre presentes na solução. O controle da concentração dos precursores é importante para evitar uma precipitação excessivamente rápida no volume da solução e favorecer a deposição sobre o substrato. Nesse processo, o citrato exerce uma função importante como agente complexante. Ao interagir com os íons Zn^{2+}, pode reduzir sua disponibilidade imediata na solução, retardando a velocidade das reações de formação do material. Esse controle é importante porque uma reação excessivamente rápida pode favorecer a formação de precipitados no próprio banho, enquanto uma reação mais lenta e controlada pode favorecer a deposição progressiva

sobre o substrato e a obtenção de um filme mais uniforme. Além da concentração e da presença do agente complexante, o pH constitui uma variável importante para o controle das reações químicas que ocorrem no banho. O hidróxido de amônio (NH_4OH) é utilizado para estabelecer e controlar o meio alcalino, sendo o pH mantido na faixa de aproximadamente 10 a 11. A temperatura e o tempo de deposição também influenciam diretamente o processo de formação dos filmes. Neste trabalho, são consideradas temperaturas na faixa de 70 a 80 °C e tempos de deposição da ordem de 2 a 3 horas. Essas condições podem modificar a velocidade de reação, a nucleação, o crescimento do filme, sua uniformidade e suas propriedades finais. A composição do banho também deve ser controlada para favorecer a formação do sulfeto de zinco e reduzir a ocorrência de fases indesejadas, especialmente óxido de zinco (ZnO). A presença excessiva de ZnO não é desejada neste estudo, uma vez que o objetivo é obter filmes predominantemente constituídos por ZnS para posterior avaliação de suas propriedades e potencial aplicação fotovoltaica.

Metodologia

O estudo consiste na deposição de filmes finos de sulfeto de zinco (ZnS) pela técnica de Deposição em Banho Químico (CBD – Chemical Bath Deposition), visando avaliar seu potencial de aplicação como camada buffer em dispositivos fotovoltaicos. Para a deposição, são utilizados cloreto de zinco ($ZnCl_2$) como fonte de Zn^{2+}, tioureia como fonte de enxofre, citrato de sódio ou citrato de cálcio como agente complexante e hidróxido de amônio (NH_4OH) para estabelecer e controlar o meio alcalino. Água deionizada é utilizada na preparação das soluções e o vidro como substrato para deposição. As concentrações dos reagentes são organizadas segundo a proporção 1:3:10, correspondente ao cloreto de zinco, citrato e tioureia, respectivamente, de 5, 15 e 50 M, permitindo investigar sua influência sobre a formação e as características dos filmes. O pH é mantido aproximadamente entre 10 e 11, com condição de interesse próxima a 11, utilizando NH_4OH para o ajuste e controle do meio. O citrato atua como agente complexante dos íons Zn^{2+}, reduzindo sua disponibilidade imediata e contribuindo para controlar a velocidade da reação. Esse controle busca reduzir a precipitação excessiva no volume da solução e favorecer o crescimento gradual do filme sobre o substrato. A temperatura do banho é considerada na faixa de 70–80 °C, enquanto o tempo de deposição é da ordem de 2 e 3 horas. Esses parâmetros, juntamente com concentração e pH, influenciam a nucleação, o crescimento, a uniformidade e as propriedades finais dos filmes. De forma simplificada, o processo envolve a disponibilização de Zn^{2+} pelo $ZnCl_2$ e de espécies sulfuradas pela tioureia, seguida da formação do ZnS: $Zn^{2+} + S^{2-} \rightarrow ZnS(s)$ A caracterização dos filmes será realizada por difração de raios X (DRX), para identificação das fases cristalinas; microscopia eletrônica de varredura (MEV), para análise da morfologia superficial; e caracterização óptica, para determinação da energia de band gap.

Resultados e Discussões

Os resultados preliminares indicam diferenças visuais entre os filmes produzidos sob diferentes condições de deposição. Observou-se que o maior acompanhamento das condições do banho pode contribuir para a obtenção de filmes visualmente mais

uniformes. A utilização do citrato apresenta importância no controle da reação, pois sua interação com os íons Zn^{2+} pode retardar sua disponibilidade e favorecer uma deposição mais gradual sobre o substrato. Esse controle é importante para evitar uma reação excessivamente rápida e a formação de grandes quantidades de precipitado no interior da solução. A concentração do precursor de zinco o citrato e tioureia, avaliados em 5, 15 e 50 M, pode modificar a quantidade de espécies disponíveis para a formação do ZnS, influenciando a nucleação, o crescimento, a morfologia e as propriedades ópticas do filme. Concentrações elevadas podem favorecer a formação de precipitados no banho, enquanto condições mais controladas podem favorecer a deposição sobre o substrato. O pH, mantido entre aproximadamente 10 e 11, também apresenta influência sobre as condições químicas do banho e sobre a disponibilidade das espécies envolvidas na formação do ZnS. O acompanhamento desse parâmetro durante a deposição é importante para avaliar sua relação com a uniformidade dos filmes. A temperatura, entre 70 e 80 °C, e o tempo de deposição, entre 2 e 3 horas, influenciam a velocidade das reações e a quantidade de material depositado. A combinação desses parâmetros deve ser analisada juntamente com concentração e pH para identificar as condições mais favoráveis ao crescimento do ZnS. Visualmente, os filmes apresentam aspecto fino sobre o vidro e, em algumas amostras, foi observada uma aparência diferenciada ou levemente rosada quando comparada ao substrato sem recobrimento. Essa observação é considerada preliminar e deverá ser relacionada às propriedades ópticas obtidas experimentalmente. A análise por DRX permitirá verificar a formação do ZnS, sua estrutura cristalina e a possível presença de fases secundárias, como ZnO. O ZnS pode apresentar estruturas cristalinas como zinc blende (cúbica) e wurtzita (hexagonal), dependendo das condições de síntese. Por meio do MEV, será possível avaliar a morfologia superficial, uniformidade, distribuição de partículas, características dos grãos e possíveis aglomerados. Já a caracterização óptica permitirá determinar o band gap dos filmes, comparando os valores experimentais com a faixa geralmente relatada para o ZnS, aproximadamente 3,5–3,9 eV. Assim, a discussão dos resultados será baseada na relação entre pH, concentração, temperatura, tempo e presença do citrato e as propriedades estruturais, morfológicas e ópticas dos filmes.

Conclusão

O estudo demonstra o potencial da Deposição em Banho Químico (CBD) como uma técnica simples e de baixo custo para a obtenção de filmes finos de ZnS. A metodologia proposta utiliza cloreto de zinco, tioureia, citrato de sódio e NH_4OH, considerando diferentes concentrações do precursor de zinco, além do controle do pH, temperatura e tempo de deposição. O controle da velocidade das reações é fundamental para favorecer a deposição do ZnS sobre o substrato. Nesse processo, o citrato exerce papel importante ao controlar a disponibilidade dos íons Zn^{2+}, podendo contribuir para uma deposição mais gradual e para a obtenção de filmes mais uniformes. Os resultados preliminares indicam que o controle das condições do banho influencia a aparência e a uniformidade dos filmes. Entretanto, a confirmação das características estruturais, morfológicas e ópticas dependerá das análises de DRX, MEV e determinação do band gap. De maneira geral, as características do ZnS, como seu elevado band gap e elevada transmitância na região visível, associadas à possibilidade de obtenção por CBD, tornam esse material promissor para investigação como camada buffer em células fotovoltaicas. A análise conjunta dos resultados permitirá estabelecer uma relação entre as condições de deposição e as propriedades dos filmes, contribuindo para determinar as condições mais

adequadas para a obtenção de ZnS com características favoráveis à aplicação fotovoltaica.

Referências

SHIN, Seung Wook; OH, Hyun Pil; PAWAR, S. M.; MOON, Jong-Ha; KIM, Jin Hyeok. Effect of complexing agent and annealing atmosphere on properties of nanocrystalline ZnS thin films. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, v. 10, n. 5, p. 3686–3690, 2010. DOI: 10.1166/jnn.2010.2330. ZHOU, Limei; XUE, Yuzhi; LI, Jianfeng. Study on ZnS thin films prepared by chemical bath deposition. Journal of Environmental Sciences, v. 21, supl. 1, p. S76–S79, 2009. DOI: 10.1016/S1001-0742(09)60042-5. EFFECT of Chemical Bath Deposition Variables on the Properties of Zinc Sulfide Thin Films: A Review. [Periódico não identificado no material recuperado], 2023. PMID: 36985752. PMC10055924. [Artigo sobre filmes finos de ZnS e propriedades do material]. National Library of Medicine, 2023. Disponível em: . Acesso em: 31 ago. 2026.

CÓDIGO: ET0942

AUTOR: PEDRO OTAVIO SANTOS DO NASCIMENTO

ORIENTADOR: MEYSAM MASHHADIKARIMI

TÍTULO: Efeito do Tempo de Moagem de Alta Energia (0h a 36h) na Evolução Microestrutural e Formação de Solução Sólida em Moinho Planetário de Esferas

Resumo

Este trabalho investigou o efeito do tempo de moagem de alta energia (0h a 36h, amostragem a cada 6h) na evolução estrutural, morfológica e mecânica dos pós da liga ternária 25Fe50Ni25Nb (% em peso), desenvolvida como ligante alternativo ao cobalto em metais duros. Os pós precursores foram moídos em moinho planetário (400 RPM, BPR 10:1) em meio úmido e caracterizados por DRX, FRX e MEV-FEG/EDS. Nos estágios iniciais, a deformação plástica severa do Fe e Ni e o fraturamento do Nb geraram estruturas lamelares. Com o avanço do processo, a liga evoluiu para grânulos equiaxiais finos e homogêneos, com tendência à aglomeração de pós ultrafinos. As análises de DRX confirmaram a paulatina dissolução atômica do Nb e do Fe na matriz de Ni, com o completo desaparecimento do pico característico do nióbio ($2\theta \approx 38,5°$) a partir de 24h, indicando a consolidação de uma solução sólida monofásica estável. Os resultados comprovam o sucesso da rota mecanoquímica e indicam que a estabilização da solução sólida é alcançada em 24h. Isso revela que as 12h finais são dispensáveis, permitindo uma redução de 33,3% no tempo de moagem, o que se traduz em considerável economia de energia, eficiência de processo e redução de custos industriais, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 9 e 12) da ONU.

Palavras-chave: Moagem de alta energia. Solução sólida monofásica. DRX. MEV-FEG.

TITLE: Effect of High-Energy Ball Milling Time (0h to 36h) on the Microstructural Evolution and Solid Solution Formation in a Planetary Ball Mill

Abstract

This work investigated the effect of high-energy ball milling time (0h to 36h, sampling every 6h) on the structural, morphological, and mechanical evolution of ternary

25Fe50Ni25Nb (wt.%) alloy powders, developed as an alternative binder to cobalt in cemented carbides. The precursor powders were milled in a planetary ball mill (400 RPM, BPR 10:1) in a wet medium and characterized by XRD, XRF and FEG-SEM/EDS. In the early stages, severe plastic deformation of Fe and Ni and fracturing of Nb generated lamellar structures. As the process progressed, the alloy evolved into fine, homogeneous equiaxed granules, with a natural tendency to form ultrafine powder agglomerates. XRD analyses confirmed the gradual atomic dissolution of Nb and Fe into the Ni matrix, with the complete disappearance of the characteristic niobium peak ($2\theta \approx 38.5°$) from 24h onwards, indicating the consolidation of a stable single-phase solid solution. The results prove the success of the mechanochemical route and indicate that the stabilization of the solid solution is achieved within 24h. This reveals that the final 12h are unnecessary, allowing a 33.3% reduction in milling time, which translates into considerable energy savings, process efficiency, and reduction of industrial operating costs, in alignment with the UN Sustainable Development Goals (SDGs 9 and 12).

Keywords: High-energy ball milling. Single-phase solid solution. XRD. FEG-SEM.

Introdução

A busca por ligantes alternativos ao cobalto para a indústria de metal duro impulsionou o interesse pelo sistema ternário Fe-Ni-Nb [1]. Como a obtenção dessas ligas por fundição convencional é inviável pelas restrições dos diagramas de fase, a Moagem de Alta Energia (MAE) surge como uma rota em estado sólido indispensável [2].

A eficácia da MAE na formação de soluções sólidas está diretamente relacionada aos fenômenos que ocorrem durante a moagem. Nesse processo, as misturas de pós são moídas conjuntamente para obtenção de uma liga homogênea através de transferência de massa [3, 4]. Por vibração ou rotação, as esferas chocam-se com as paredes do vaso, e o pó é repetidamente levado a solda, fratura e ressolda num intenso ciclo de transferência de energia que possibilita a nanoestruturação dos materiais [5]. Isso é manifestado pela presença de vários defeitos cristalinos (discordâncias, vazios, falhas de empilhamento), que reduzem o tamanho de cristalito e aumentam a difusividade dos solutos, resultando em alta sinterabilidade em relação à moagem convencional [6, 7]. O tempo de moagem é o parâmetro crítico; períodos curtos mantêm o sistema segregado fisicamente, enquanto o tempo ótimo estabelece o regime permanente (steady-state), consolidando a solução sólida monofásica desejada [8]. Contudo, a sobremoagem traz o risco de contaminação por desgaste das esferas e recuperação de defeitos [9, 10].

A relação entre o tempo de moagem e as alterações estruturais do material foi investigada por Aquino (2019), ao sintetizar a liga 49%Fe-36%Ni-15%Nb e analisar amostras com o tempo de moagem diferente [8]. Observou-se que o aumento do tempo de moagem promoveu o desaparecimento dos picos tanto de Ni quanto de Nb, indicando que esses elementos foram completamente dissolvidos no Fe, resultando na formação da solução sólida Fe-Ni-Nb. A liga demonstrou um comportamento inversamente proporcional entre o refinamento estrutural e as deformações geradas na rede cristalina ao longo do tempo de moagem [8, 11]. Enquanto o ferro e o níquel possuem raios atômicos muito semelhantes (0,124 nm e 0,125 nm, respectivamente), permitindo uma substituição atômica com distorções minimizadas, o nióbio apresenta

um raio atômico substancialmente maior, de 0,146 nm [12]. Essa incompatibilidade dimensional causa uma expansão localizada nos planos cristalográficos da matriz de ferro, o que se traduz no aumento exponencial da microdeformação da rede [13]. Para atenuar a energia interna armazenada, a rede cristalina sofre processos de subdivisão de grão, fragmentando as estruturas originais e reduzindo o tamanho de cristalito para a escala nanométrica (de 24,8 nm para 2,7 nm), corroborando com a diminuição da intensidade dos picos e o alargamento dos mesmos, assim caracterizando o fenômeno de formação de solução sólida [14].

Considerando a influência do tempo de moagem sobre a formação da solução sólida, o objetivo deste trabalho foi avaliar o seu efeito na formação de uma solução sólida de 25Fe50Ni25Nb como substituto ao cobalto no metal duro [15, 16]. A liga foi moída em MAE (rotação de 400 rpm e BPR 10:1) por 36 horas, tendo amostras recolhidas a cada 6 horas de moagem. A caracterização dos pós foi realizada através de MEV, FEG/EDS, FRX e DRX. As análises de DRX evidenciaram a progressiva dissolução atômica do Nb e do Fe na matriz de níquel [17]. O pico característico do nióbio ($2\theta \approx 38{,}5°$) atenuou-se gradativamente até o completo desaparecimento a partir de 24 horas de processamento, sinalizando o atingimento do regime permanente (steady-state) [18]. Esse resultado comprova que a solução sólida monofásica desejada é plenamente consolidada em 24 horas, demonstrando que as 12 horas finais de moagem são dispensáveis, resultando em uma redução significativa no tempo de processamento que se traduz em economia de energia e eficiência para a escala industrial [19, 20].

Metodologia

2.1 Materiais Precursores e Preparação

Nesta seção estão apresentados os materiais, métodos e instrumentos utilizados no desenvolvimento dessa pesquisa. Os trabalhos foram realizados nos seguintes Laboratórios: Laboratório de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais - LMCME, Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica e Caracterização de Materiais - LIME e Laboratório de Manufatura Aditiva e Prototipagem - LaMaP da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Para a síntese do material, foram utilizados pós precursores comerciais de Ferro, Níquel e Nióbio, fornecidos pelas empresas BioTec, Dinâmica e BMMC, com pureza nominal de 99,05%, 99,26% e 99,60%, respectivamente. A mistura inicial foi dimensionada na proporção mássica de 25Fe50Ni25Nb, totalizando uma massa de 20g. A homogeneização prévia dos pós foi realizada em almofariz de ágata por 5 minutos antes do carregamento nos vasos de moagem, formando a amostra de 0 horas. A proporção do compósito está representada na tabela (1).

Tabela 1 - Proporção mássica e distribuição equimolar dos elementos precursores para a síntese da liga 25Fe50Ni25Nb

2.2 Parâmetros de Operação do Moinho Planetário

Após a mistura, o compósito foi levado à moagem de alta energia (MAE) em moinho planetário de modelo Pulverisette 7, considerando uma razão bola:pó de 10:1. O conjunto de moagem consistiu em cadinhos e esferas de carbeto de tungstênio (93%WC-6%Co, densidade de 14,9g/cm3). Os cadinhos de volume total de 45 mL(capacidade útil de 3 a 22 mL), foram preenchidos pelo compósito submerso em álcool Etileno PA como meio úmido da moagem, evitando oxidação e reduzindo temperatura [21]. As esferas empregadas apresentavam diâmetros de 10mm e 15mm, com massas unitárias de 7,70 g e 25,98 g, respectivamente.

A moagem foi realizada em uma velocidade contínua de 400 RPM, adotando-se um ciclo intercalado de 3 horas de processamento por 15 minutos de descanso para controle da temperatura do sistema [22].

2.3 Procedimento de amostragem temporal

A rota adotada para o estudo está representada na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma da preparação da liga FeNiNb

2.4. Técnicas e Parâmetros de Caracterização

As transformações morfológicas resultantes do tempo de moagem foram monitoradas por um conjunto de técnicas analíticas.

Fluorescência de Raios X (FRX) realizada no equipamento da Shimadzu de modelo EDX-7200 na atmosfera de vácuo e colimador em 10mm.

Difração de Raios X (DRX) modelo Miniflex II da Rigaku operando com radiação Cu-Kα ($\lambda = 1{,}5406$ Å), na faixa angular 2θ de 0° a 120°, com passo de 0,005 à 5°/min, aplicando o método Williamson-Hall para o cálculo do tamanho de cristalito e microdeformação.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) da Bruker, operando com tensão de aceleração de 7 kV para os pós iniciais até 10 kV para as amostras após moagem, e magnificação de 5000X.

Resultados e Discussões

3.1 Evolução Estrutural e Formação da Solução Sólida (DRX):

Os difratogramas de raios X dos pós precursores (0h) confirmam a elevada cristalinidade inicial de cada elemento puro, exibindo picos finos e definidos de Fe, Ni e Nb (Figura 2). Com o avanço da Moagem de Alta Energia (6h a 18h), observa-se um acentuado alargamento e queda na intensidade das reflexões braggianas, associados ao refinamento contínuo do tamanho de cristalito para a escala nanométrica e ao aumento progressivo da microdeformação induzida pelo acúmulo de defeitos cristalinos (Figura 3) [23,24].

A evolução temporal evidencia a paulatina dissolução atômica do Nb e do Fe na matriz de Níquel. Como observado na Figura 3 o pico característico do Nb (2θ 38,5°) atenua-se gradativamente até desaparecer quase por completo entre 24h e 36h de processamento, indicando o sucesso da transferência de massa [25].

Essa transformação é impulsionada pelas curtas distâncias de difusão do estado nanoestruturado e pela alta energia interna armazenada no sistema. A incorporação do átomo de Nióbio, cujo raio atômico (0,146 nm) é superior aos do Fe e Ni (0,124 nm e 0,125 nm), causa acentuada distorção na rede cristalina, resultando no perfil achatado e difuso do padrão de difração ao final das 36 horas [26,27].

Figura 2 - Difratogramas de raios X (DRX) dos pós precursores isolados

Figura 3 - evolução estrutural da mistura 25Fe50Ni25Nb em função do tempo de moagem de 0h a 36h.

3.2 Morfologia e Mapeamento Composicional (MEV-FEG e EDS):

A caracterização morfológica dos pós precursores e da mistura mecânica sem

moagem (amostra de 0h) constitui uma etapa fundamental para estabelecer a base comparativa da evolução microestrutural. O pó de ferro (Figura 3 a-b) puro comercial exibe uma morfologia predominantemente irregular e dendrítica/esponjosa, o que é característico

de pós obtidos por processos de redução ou eletrólise. Essa rugosidade superficial e

irregularidade geométrica são altamente benéficas na metalurgia do pó inicial, pois

aumentam a área de contato efetiva e promovem um intertravamento mecânico

favorável entre as partículas durante a compactação prévia [4,5,17].

Figura 4 - MEV dos pós precursores puramente comerciais: (a-b) Fe; (c-d) Ni; (e-f) Nb.

Na amostra correspondente à mistura mecânica inicial (FeNiNb 0h), homogeneizada em almofariz de ágata por 5 minutos na proporção mássica de 25%Fe - 50%Ni - 25%Nb, observa-se que as fases coexistem de forma puramente física e segregada. A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) apresentada na Figura 4, revela claramente a distinção morfológica entre as partículas individuais de cada elemento químico precursor, sem que haja qualquer evidência de ligação metalúrgica, deformação plástica significativa ou coalescência decorrente de efeitos térmicos ou mecânicos.

Esse estado de segregação espacial é robustamente corroborado pelas análises de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) e mapeamento elementar (Figura 5-c). O mapeamento de raios X demonstra de forma inequívoca que cada elemento químico (Fe, Ni e Nb) está estritamente restrito aos seus respectivos domínios de partícula originais. O espectro pontual realizado em partículas isoladas da mistura de 0h confirma composições químicas próximas de 100% para o respectivo metal constituinte daquela partícula analisada, confirmando a ausência completa de interdifusão atômica inicial sob as condições de homogeneização manual básicas [1,3,5].

Figura 5 - Caracterização morfológica e composicional da amostra sem moagem (FeNiNb 0h): (a-b) micrografias de MEV evidenciando a segregação física das fases; (c) mapeamento elementar por EDS (Fe, Ni e Nb).

A evolução morfológica da liga 25Fe50Ni25Nb em função do tempo de processamento por Moagem de Alta Energia (MAE) reflete de forma fidedigna a competição contínua entre os fenômenos de soldagem a frio (cold welding), deformação plástica severa e fraturamento de partículas. Essa dinâmica cíclica é impulsionada pela elevada energia cinética transferida às partículas de pó pelos frequentes impactos promovidos pelas esferas de carbeto de tungstênio (WC-Co) sob rotação de 400 RPM no moinho planetário [4,17,22].

Após 6 horas de moagem (Figura 6), observa-se uma alteração morfológica drástica no compósito. Devido à alta ductilidade intrínseca do Ferro e do Níquel, o impacto mecânico repetitivo atua esmagando e achatando as partículas originais. Esse comportamento resulta na transição para uma morfologia predominantemente lamelar, caracterizada pelo aparecimento de placas ou flocos (flakes) altamente deformados. Ao mesmo tempo, o Nióbio (metal refratário com maior dureza e menor capacidade de deformação plástica a frio) sofre fraturamento severo, gerando pequenos fragmentos angulares. Esses fragmentos de Nióbio começam a ser aprisionados e incrustados entre as lamelas dúcteis de Ferro e Níquel que sofrem soldagem a frio [10,22,23].

Figura 6 - Evolução microestrutural e distribuição elementar após 6 horas de moagem (FeNiNb 6h): (a-b) micrografias de MEV exibindo estrutura lamelar; (c) mapeamento por EDS.

Com o avanço do tempo de moagem para 12 horas (Figura 7), a taxa de soldagem a frio torna-se dominante devido à alta ductilidade residual dos metais deformados e ao aumento das superfícies ativas criadas por fraturas. Esse fenômeno promove a sobreposição e soldagem tridimensional das lamelas finas anteriormente geradas, resultando no espessamento (thickening) substancial das partículas e na formação de aglomerados de morfologia irregular, porém mais robustos e volumosos. Nesta etapa, a estrutura interna das partículas começa a se refinar microscopicamente [17,23,29].

Figura 7 - Evolução microestrutural e distribuição elementar após 12 horas de moagem (FeNiNb 12h): (a-b) micrografias de MEV mostrando o espessamento de aglomerados por soldagem a frio; (c) mapeamento por EDS.

Em tempos mais avançados de processamento, tipicamente representados pelas amostras de 18 horas e 24 horas (Figura 8) deformação plástica no retículo cristalino gera uma alta densidade de defeitos (discordâncias, vazios e falhas de empilhamento), levando ao encruamento severo dos pós. Com o esgotamento da capacidade de deformação plástica a frio, as partículas tornam-se altamente frágeis e propensas à nucleação e rápida propagação de trincas internas. Consequentemente, o mecanismo de fraturamento mecânico por fadiga passa a predominar fortemente sobre a soldagem a frio, desencadeando uma redução acentuada no tamanho médio de partícula do pó e favorecendo uma morfologia nitidamente mais equiaxial, fina e com distribuição de tamanho de partícula estreita e homogênea [8,17,18,23].

Figura 8 - Evolução microestrutural e distribuição elementar nos estágios intermediários/avançados: (a-c) amostra FeNiNb 18h e (d-f) amostra FeNiNb 24h, (a,b,d,e) indicando o predomínio de fraturamento mecânico e morfologia equiaxial (c,f) mapeamento por EDS.

O prolongamento do tempo de moagem para 30 horas consolida a transição das partículas para o estágio de equilíbrio dinâmico entre soldagem a frio e fraturamento. A análise das micrografias eletrônicas de varredura presentes na Figura 9 revela uma homogeneidade morfológica ainda mais pronunciada em relação ao estágio de 24h. As partículas se apresentam predominantemente pequenas, arredondadas (equiaxiais) e com distribuição de tamanho muito estreita. No entanto, devido ao tamanho submicrométrico extremamente reduzido das partículas individuais e à consequente altíssima área superficial específica por unidade de volume, observa-se uma tendência natural à

formação de aglomerados volumosos compostos de pós ultrafinos por forças de van der Waals secundárias e atração eletrostática. Essa aglomeração estrutural é um fenômeno amplamente reportado para materiais processados por moagem de alta energia por tempos extensos, onde a alta energia de superfície acumulada busca ser termodinamicamente minimizada através da aproximação física e empacotamento dessas partículas finas secundárias [17,20,21].

Figura 9 - Evolução microestrutural e distribuição elementar após 30 horas de moagem (FeNiNb 30h): (a-b) micrografias de MEV mostrando partículas finas e equiaxiais com tendência à aglomeração; (c) mapeamento por EDS.

Ao atingir o tempo de 36 horas de moagem, o sistema atinge plenamente o estado de regime permanente (steady-state). O exame detalhado das micrografias eletrônicas de varredura presentes na Figura 10, demonstra de forma inequívoca que as taxas de soldagem a frio e de fraturamento mecânico se equilibram de maneira estável. Não se detectam alterações morfológicas significativas na forma geométrica ou no tamanho médio das partículas quando comparadas ao estágio de 30h, permanecendo os pós finamente divididos, com morfologia caracterizada por grânulos equiaxiais densamente compactados de escala estrutural nanométrica. Esse equilíbrio atua como um fator limitante contra o

crescimento grosseiro por coalescência ou contra o refino descontrolado das partículas, resultando em uma liga com reologia final altamente homogênea, excelente sinterabilidade e propriedades ideais para atuar como ligante metálico nanoestruturado alternativo para o sistema WC-Co em metal duro [1,3,8,24].

Figura 10 - Evolução microestrutural e distribuição elementar no regime permanente após 36 horas de moagem (FeNiNb 36h): (a-b) micrografias de MEV exibindo grânulos nanoestruturados homogêneos; (c) mapeamento por EDS.

Conclusão

A busca por ligantes metálicos alternativos ao cobalto na indústria de metal duro impulsionou o interesse pelo sistema ternário Fe-Ni-Nb, cuja fabricação por métodos convencionais de fusão é inviabilizada pelas restrições termodinâmicas de seus diagramas de fases, tornando a metalurgia do pó uma rota em estado sólido indispensável [1, 3]. Diante desse desafio, o presente trabalho investigou o efeito do tempo de moagem de alta energia (0h a 36h) na evolução morfológica e estrutural da liga 25Fe50Ni25Nb em moinho planetário (400 RPM, razão esfera:pó 10:1) [8]. A

caracterização por DRX, FRX e MEV-FEG/EDS estabeleceu uma base metodológica robusta para o controle das variáveis de processo [1, 8, 17].

Os resultados revelaram que o processamento é regido inicialmente por fenômenos competitivos de deformação plástica severa nos elementos dúcteis (Fe e Ni) e fraturamento no elemento refratário (Nb), evoluindo de uma mistura física para estruturas lamelares com refinamento contínuo [17, 19]. Com o avanço das colisões, a deformação plástica acumulou elevada densidade de defeitos cristalinos e discordâncias, promovendo a fragmentação mecânica por fadiga e o refinamento do tamanho de cristalito para a escala nanométrica, quantificado pelo método Williamson-Hall [13, 30].

A interdifusão atômica forçada promoveu a dissolução completa do nióbio e do ferro na matriz de níquel, consolidando a formação de uma solução sólida monofásica estável na matriz de níquel [6, 7], sem evidência de contaminação nos padrões de difração [8]. A faixa entre 24h e 36h consolidou-se como o tempo ótimo para a homogeneização completa e estabilização da solução sólida [26, 21]. O equilíbrio dinâmico estável (steady-state) entre as taxas de soldagem a frio e fraturamento resultou em pós equiaxiais finamente divididos e com tendência controlada à aglomeração [8, 9, 29].

Em suma, a rota mecanoquímica mostrou-se altamente bem-sucedida, demonstrando que a estabilização da solução sólida é plenamente alcançada em 24 horas de moagem [8, 10, 11]. Este resultado comprova que as 12 horas finais de processamento são dispensáveis, permitindo uma redução de 33,3% no tempo de moagem que se traduz em considerável economia de energia, eficiência de processo e redução de custos operacionais na escala industrial [24]. Os pós obtidos apresentam reologia homogênea e excelente sinterabilidade, revelando forte viabilidade para substituir o cobalto em ferramentas de corte e componentes resistentes ao desgaste [28]. Adicionalmente, a validação desta rota alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especificamente o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) [24, 26, 29].

Referências

[1] RAIMUNDO, R. Efeito da moagem de alta energia e da pressão de compactação na densidade e nas propriedades físicas do compósito Cu20%WC. 2016. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/24496.

[2] CHICINAȘ, H. F. et al. Influence of milling media on the properties of some hard metal powders. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 96, p. 105470, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105470.

[3] SOHONI, S. et al. The effects of grinding aids on the fine grinding of limestone, quartz, and Portland cement clinker. Powder Technology, v. 67, n. 3, p. 277-286, 1990. DOI: https://doi.org/10.1016/0032-5910(90)80112-9.

[4] SURYANARAYANA, C. Mechanical alloying and milling. Progress in Materials Science, v. 46, n. 1-2, p. 1-184, 2001. DOI: https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9.

[5] GAFFET, E.; ABDELLAOUI, M.; MALHOUROUX-GAFFET, N. Formation of Nanostructural Materials Induced by Mechanical Processings. Materials Transactions, JIM, v. 36, n. 2, p. 198-209, 1995. DOI: https://doi.org/10.2320/matertrans1989.36.198.

[6] POPA, F. et al. High Milling Time Influence on the Phase Stability and Electrical Properties of Fe50Mn35Sn15 Heusler Alloy Obtained by Mechanical Alloying. Materials, v. 17, n. 17, p. 4355, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/ma17174355.

[7] HANNORA, A. E.; HANNA, F. F.; MAREI, L. K. Formation of Super Saturated Solid Solution Fe-50wt.%Cu by High Energy Ball Milling (Attritor). In: Proceedings of the 17th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering (AMME), Cairo, Egypt, 2016. Disponível em: https://www.mtc.edu.eg/pub/Issues/IssuesPaper/20170111_115859.pdf.

[8] AQUINO, Gabriel Matos Malafaia de. Síntese da liga 49% Fe-36% Ni-15%Nb por mecanosíntese e posterior sinterização por plasma pulsado para uso em ferramentas diamantadas. 2019. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2019. Disponível em: https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2020/02/TESE-Gabriel-Aquino-vers%C3%A3o-final.pdf.

[9] CARRILLO, Albert et al. Structural, Thermal and Magnetic Analysis of Fe75Co10Nb6B9 and Fe65Co20Nb6B9 Nanostructured Alloys. Materials, v. 14, n. 16, p. 4542, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14164542.

[10] LAMOGLIA, Marcela Silva et al. Effect of Process Control Agents on Fe-15at.%Nb powder during Mechanical Alloying. Materials Research, v. 25, e20210318, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0318.

[11] OANH, N. T. H. et al. Nanocrystalline/Amorphous Tuning of Al-Fe-Nb (Mn) Alloy Powders Produced via High-Energy Ball Milling. Materials, v. 17, n. 22, p. 5627, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/ma17225627.

[12] RODRÍGUEZ-DÍAZ, R. A. et al. Synthesis of a nanostructured Al alloy modified with Fe by high energy ball milling. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, v. 10, n. 2, p. 721-728, 2015. Disponível em: https://chalcogen.ro/721_Rodriguez.pdf.

[13] WILLIAMSON, G. K.; HALL, W. H. X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram. Acta Metallurgica, v. 1, n. 1, p. 22-31, 1953. DOI: https://doi.org/10.1016/0001-6160(53)90006-6.

[14] SÜBÜTAY, Halit; ŞAVKLIYILDIZ, İlyas. Effect of High-Energy Ball Milling in Ternary Material System of (Mg-Sn-Na). Crystals, v. 13, n. 8, p. 1230, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/cryst13081230.

[15] DUDINA, Dina V.; BOKHONOV, Boris B. Materials Development Using High-Energy Ball Milling: A Review Dedicated to the Memory of M.A. Korchagin. Journal of Composites Science, v. 6, n. 7, p. 188, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/jcs6070188.

[16] ASSAAD, J. J. et al. Effect of specific energy consumption on fineness of Portland cement incorporating amine or glycol-based grinding aids. Materials and Structures, v. 42, n. 8, p. 1077-1087, 2009. DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-008-9444-2.

[17] PRZIWARA, Paul; KWADE, Arno. Grinding aids for dry fine grinding processes - Part I: Mechanism of action and lab-scale grinding. Powder Technology, v. 375, p. 146-160, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.020.

[18] MEDEIROS, Sloany Guedes. Processamento de compósitos Ni-NbC e Ni-WC pelas técnicas de moagem de alta energia e granulação em tambor. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/items/ba6b69dd-9375-4d72-98b0-c3a0680320a3.

[19] ÇELEBI, Müslim; ÇANAKÇI, Aykut; ÖZKAYA, Serdar. Effect of mechanical milling time on powder characteristic, microstructure, and mechanical properties of AA2024/B4C/GNPs hybrid nanocomposites. Powder Technology, v. 449, p. 120439, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120439.

[20] PRZIWARA, Paul; BREITUNG-FAES, Sandra; KWADE, Arno. Comparative study of the grinding aid effects for dry fine grinding of different materials. Minerals Engineering, v. 144, p. 106030, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106030.

[21] SHAH, U. V. et al. Effect of milling temperatures on surface area, surface energy and cohesion of pharmaceutical powders. International Journal of Pharmaceutics, v. 495, n. 1, p. 234-240, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2015.08.083.

[22] ZEBARJAD, S. M.; SAJJADI, S. A. Dependency of physical and mechanical properties of mechanical alloyed Al-Al2O3 composite on milling time. Materials & Design, v. 28, n. 7, p. 2113-2120, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.05.011.

[23] DEHAGHANI, Majid Taghian et al. Effect of ball milling on the physical and mechanical properties of the nanostructured Co-Cr-Mo powders. Advanced Powder Technology, v. 25, n. 6, p. 1793-1799, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.07.012.

[24] ALIJANI, F. et al. Effect of milling time on the structure, micro-hardness, and thermal behavior of amorphous/nanocrystalline TiNiCu shape memory alloys developed by mechanical alloying. Materials & Design, v. 55, p. 373-380, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.009.

[25] TORRES, C. dos S.; SCHAEFFER, L. Efeito da moagem de alta energia na morfologia e compressibilidade do compósito WC-Ni. Matéria (Rio de Janeiro), v. 15, p. 88-95, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-70762010000100011.

[26] OANH, Nguyen Thi Hoang; VIET, Nguyen Hoang. Amorphization-Densification Coupling Governs Hardness Enhancement in SPS-Consolidated Al-Fe-Nb-(Ni,Ti) Metastable Alloys. Materials, v. 19, n. 12, p. 2628, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/ma19122628.

[27] SVERAK, T. S. et al. Efficiency of grinding stabilizers in cement clinker processing. Minerals Engineering, v. 43-44, p. 52-57, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.08.010.

[28] SILVA, Thalita Queiroz e. Endurecimento do pó de cobre com carbeto de tungstênio via moagem de alta energia. 2022. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2022.

[29] DRESSEL, D.; STARK, J. Modern grinding aids and their influence on the hydraulic properties of GBFS. ZKG International, v. 63, n. 2, p. 43-54, 2010.

[30] SÜBÜTAY, Halit; ŞAVKLIYILDIZ, I. The relationship between structural evolution and high energy ball milling duration in tin reinforced Mg alloys. Materials Today Communications, v. 35, p. 105868, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105868.

Anexos



Tabela 1 - Proporção mássica e distribuição equimolar dos elementos precursores para a síntese da liga 25Fe50Ni25Nb



Figura 1 - Fluxograma da preparação da liga FeNiNb



Figura 2 - Difratogramas de raios X (DRX) dos pós precursores isolados



Figura 3 - evolução estrutural da mistura 25Fe50Ni25Nb em função do tempo de moagem de 0h a 36h.



Figura 4 - MEV dos pós precursores puramente comerciais: (a-b) Fe; (c-d) Ni; (e-f) Nb.



Figura 5 - Caracterização morfológica e composicional da amostra sem moagem (FeNiNb 0h): (a-b) micrografias de MEV evidenciando a segregação física das fases; (c) mapeamento elementar por EDS (Fe, Ni e Nb).



Figura 6 - Evolução microestrutural e distribuição elementar após 6 horas de moagem (FeNiNb 6h): (a-b) micrografias de MEV exibindo estrutura lamelar; (c) mapeamento por EDS.



Figura 7 - Evolução microestrutural e distribuição elementar após 12 horas de moagem (FeNiNb 12h): (a-b) micrografias de MEV mostrando o espessamento de aglomerados por soldagem a frio; (c) mapeamento por EDS.



Figura 8 - Evolução microestrutural e distribuição elementar nos estágios intermediários/avançados: (a-c) amostra FeNiNb 18h e (d-f) amostra FeNiNb 24h, (a,b,d,e) indicando o predomínio de fraturamento mecânico e morfologia equiaxial (c,f) mapeamento por



Figura 9 - Evolução microestrutural e distribuição elementar após 30 horas de moagem (FeNiNb 30h): (a-b) micrografias de MEV mostrando partículas finas e equiaxiais com tendência à aglomeração; (c) mapeamento por EDS.



Figura 10 - Evolução microestrutural e distribuição elementar no regime permanente após 36 horas de moagem (FeNiNb 36h): (a-b) micrografias de MEV exibindo grânulos nanoestruturados homogêneos; (c) mapeamento por EDS.

CÓDIGO: ET0947

AUTOR: PEDRO RILDER DA SILVA OLIVEIRA

ORIENTADOR: ANDRE LUIS LOPES MORIYAMA

TÍTULO: Avaliação da evolução fotocatalítica de hidrogênio utilizando niobato de sódio estruturado em pellets cerâmicos e etanol como agente de sacrifício

Resumo

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de fontes de energia mais sustentáveis têm impulsionado pesquisas voltadas ao desenvolvimento de alternativas aos combustíveis fósseis. Nesse contexto, o hidrogênio destaca-se como um vetor energético promissor, principalmente quando produzido por rotas de baixo impacto ambiental. A fotocatálise apresenta potencial para essa finalidade por utilizar a radiação luminosa para promover reações capazes de gerar hidrogênio a partir da água. Entre os semicondutores estudados, o niobato de sódio ($NaNbO_3$) apresenta propriedades favoráveis à aplicação fotocatalítica. Entretanto, sua utilização na forma de pó pode dificultar a recuperação do material e favorecer seu arraste pelo meio reacional, tornando relevante sua imobilização em suportes adequados. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema fotocatalítico utilizando $NaNbO_3$ incorporado a pellets cerâmicos de argila para produção de hidrogênio. Especificamente, buscou-se obter o fotocatalisador pelo método de complexação EDTA-Citrato, incorporá-lo à matriz cerâmica, produzir e caracterizar os pellets por difração de raios X (DRX) e Microscopia de varredura (MEV) e desenvolver um fotorreator de leito fixo com radiação UV-C para aplicação nos ensaios fotocatalíticos.

Palavras-chave: fotocatálise. hidrogênio verde. suporte cerâmico. niobato de sódio.

TITLE: Evaluation of photocatalytic hydrogen evolution using sodium niobate structured in ceramic pellets and ethanol as sacrificial agent

Abstract

The growing concern about climate change and the need for more sustainable energy sources have driven research toward the development of alternatives to fossil fuels. In this context, hydrogen stands out as a promising energy carrier, particularly when produced through low-environmental-impact routes. Photocatalysis has potential for this purpose by using light radiation to promote reactions capable of generating hydrogen from water. Among the semiconductors studied, sodium niobate ($NaNbO_3$) presents favorable properties for photocatalytic applications. However, its use in powder form can hinder material recovery and promote its removal by the reaction medium, making its immobilization on suitable supports relevant. Thus, this study aimed to develop a photocatalytic system using $NaNbO_3$ incorporated into ceramic clay pellets for hydrogen production. Specifically, the study sought to obtain the photocatalyst through the EDTA-Citrate complexation method, incorporate it into the ceramic matrix, produce and characterize the pellets by X-ray diffraction (XRD), and develop a fixed-bed photoreactor equipped with UV-C radiation for application in photocatalytic tests.

Keywords: photocatalysis. green hydrogen. ceramic support. sodium niobate.

Introdução

Nas últimas décadas, os problemas ambientais têm se intensificado e com isso os problemas energéticos. Tendo em vista a necessidade de se obter energia limpa tem crescido devido ao efeito estufa, que é agravado por meios de produção de energia não renováveis e que produzem gases que atenuam esse processo (LUIZ, 2026).O petróleo, o carvão mineral e o gás natural ainda representam a maior parcela da matriz energética global, sua utilização está diretamente associada à emissão de dióxido de carbono (CO_2) e de outros poluentes atmosféricos, contribuindo significativamente para o agravamento das mudanças climáticas e do aquecimento global (PINTO, 2025).Essa realidade estimula o aumento das pesquisas científicas visando a criação e o desenvolvimento de novas formas de produção de energia limpa e sustentável.

Nesse contexto, o hidrogênio destaca-se como um vetor energético promissor devido ao seu elevado poder energético, cerca de 121kJ/g, aproximadamente 2,4 vezes mais energia que o gás natural e ao fato de que sua utilização em células a combustível ou em processos de combustão produz essencialmente água como subproduto, não emitindo dióxido de carbono durante sua conversão em energia (DE LARA, 2023). Entretanto, a maior parte do hidrogênio produzido atualmente é obtido a partir do uso de combustíveis fósseis, processo responsável por elevadas emissões de CO_2 (FRAGOSO, 2025).

Dessa forma, o hidrogênio verde, hidrogênio produzido por eletrólise da água utilizando energia solar ou eólica, tem recebido crescente atenção da comunidade científica e industrial. (PRINZHOFER, 2019), (BOCA, 2025). Nessa situação, está a fotocatálise, processo em que um semicondutor é excitado por radiação luminosa, gerando pares elétron-buraco que participam de reações redução-oxidação capazes de decompor a molécula de água em H_2 e O_2 (LOPES, 2015).

Uma fotocatálise eficiente exige um semicondutor com banda de condução mais negativa que o potencial H^+/H_2, banda de valência mais positiva que o potencial O_2/H_2O, e bandgap superior a 1,8 eV (ZHOU, 2020). Nesse contexto, o niobato de sódio se destaca como um semicondutor promissor: sua estrutura octaédrica de NbO_6 favorece a separação efetiva do par elétron-buraco, resultando em bom desempenho fotocatalítico (AHMAD; FAROOQ; PHUL, 2018). O material ainda reúne propriedades ópticas adequadas, boa estabilidade química e bandas energéticas favoráveis à evolução de hidrogênio (NAWAZ; ALMOFTY; QURESHI, 2018).

Para aumentar a eficácia desse processo geralmente são utilizados agentes sacrificiais, doadores de elétrons ou eliminadores de lacunas que reduzem a tendência de recombinação de portadores de carga foto excitados, adicioná-los é essencial para impulsionar drasticamente a evolução fotocatalítica do H2 (ZHANG, 2022). O etanol se destaca como um excelente agente de sacrifício, pois é uma molécula amplamente disponível, de baixo custo, e apresenta alta eficiência na supressão de buracos devido à sua estrutura hidroxilada e elevada reatividade, tornando-se um dos reagentes mais eficazes na foto produção de hidrogênio WANG (2022).

Os reatores de leito fixo são amplamente empregados em processos catalíticos, nos quais o material ativo permanece acondicionado no interior de uma coluna ou tubo, enquanto o meio reacional escoa continuamente através do leito. Essa configuração favorece o contato entre os reagentes e o catalisador, possibilitando a operação contínua e mantendo os pellets confinados no sistema, evitando sua dispersão na corrente de saída. Além disso, o controle da vazão é importante, pois influencia diretamente o tempo de residência e a conversão do processo. (LAFIA, 2023)

Sendo assim, os objetivos deste trabalho é sintetizar o niobato de sódio (NaNbO3), e suportá-lo em material cerâmico formando pellets cilíndricos e avaliar o desempenho fotocatalítico dos mesmos em um reator de leito fixo para produção de hidrogênio em solução aquosa contendo etanol como agente de sacrifício (LOPEZ, 2015).

Metodologia

2.1 Síntese do precursor de nióbio

O fotocatalisador niobato de sódio ($NaNbO_3$) foi obtido pelo método de complexação EDTA-Citrato. O precursor tris(oxalato)oxiniobato de amônio foi sintetizado por fusão de Nb_2O_5 e $KHSO_4$ (proporção 1:7), seguida de complexação oxálica (razão molar nióbio:oxalato de 1:3), conforme metodologia de Souto (2017).

2.2 Síntese do Niobato de Sódio (NaNbO3)

A síntese do $NaNbO_3$ foi realizada pelo método de complexação EDTA-Citrato, conforme a metodologia proposta por Dos Santos (2014), empregando-se a proporção molar de 1:1:1,5 entre íons metálicos, EDTA e ácido cítrico.

Inicialmente, preparou-se uma solução de EDTA ácido em hidróxido de amônio na proporção de 1:10 (g/mL), denominada solução I, mantida sob agitação magnética a 40 °C durante 15 minutos. Em seguida, o $NaNO_3$ e o precursor tris(oxalato)oxiniobato de amônio foram pesados conforme a proporção molar estabelecida e dissolvidos separadamente em água destilada. As soluções foram então adicionadas à Solução I, mantendo-se a temperatura de 40 °C e a agitação por mais 15 minutos, obtendo-se a Solução II.

Posteriormente, adicionou-se à Solução II o ácido cítrico previamente dissolvido em água destilada. O pH foi ajustado para aproximadamente 9 mediante a adição de 6 mL de hidróxido de amônio. A solução resultante, denominada Solução III, foi mantida sob agitação a 80 °C até a evaporação parcial do solvente e formação de um gel viscoso.

O gel obtido foi pré-calcinado em mufla a 230 °C por 3 horas, formando um sólido preto, que foi posteriormente macerado em um almofariz com pistilo. O material pulverizado foi então calcinado a 900 °C por 4 horas, visando à formação do $NaNbO_3$ cristalino.

2.3 Produção de pellets

A produção dos pellets foi realizada a partir da preparação da massa cerâmica, ajuste da umidade, conformação e tratamento térmico.

2.3.1 Preparo da massa cerâmica

Inicialmente, a argila foi seca por 24 horas para remoção parcial da umidade e preparação para a moagem. Em seguida, foi submetida à moagem em moinho de bolas, contendo esferas de 3 a 5 cm de diâmetro, a aproximadamente 98 rpm por 10 minutos, visando à redução do tamanho das partículas e à homogeneização do material. Posteriormente, a argila moída foi peneirada em mesa vibratória por aproximadamente 5 minutos, utilizando uma série de peneiras granulométricas, sendo a última de malha Mesh 35.

2.3.2 Ajuste de plasticidade e moldagem

Antes da incorporação do fotocatalisador, determinou-se a umidade higroscópica da argila, parâmetro que influencia sua plasticidade e a qualidade da moldagem dos pellets. A partir desse resultado, calculou-se a quantidade de água necessária para atingir a faixa de plasticidade recomendada para materiais cerâmicos, entre 24% e 40% em massa (MÁRQUEZ, 2012). Para a determinação, a argila foi mantida em estufa a 105 °C por 24 horas, promovendo a remoção da água higroscópica presente na amostra.

A massa de água removida foi determinada pela Equação abaixo:

$$MH_2O = Mi + Mc - Mf$$

onde:

MH_2O é a massa de água presente na amostra;

Mi é a massa inicial da argila;

Mc é a massa do cadinho;

Mf é a massa final do conjunto após a secagem.

A conformação dos pellets foi realizada utilizando um molde confeccionado por impressão 3D em resina ABS preta, com cavidades de aproximadamente 5 mm de altura e 5 mm de largura. Uma visão melhor do molde pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Foto do molde impresso em 3D

Fonte: autoria própria

Após a moldagem, os corpos cerâmicos permaneceram em repouso durante aproximadamente 24 horas, permitindo a evaporação gradual da umidade e facilitando sua retirada do molde sem ocorrência de deformações ou fissuras.

Após, os pellets foram submetidos ao tratamento térmico em mufla seguindo a seguinte programação de rampas: aquecimento a 200 °C durante 1 hora, após a 570 °C durante 1 hora,; e, por fim, calcinação a 900 °C durante 4 horas.

2.4 Caracterização dos pellets

Os pellets produzidos e a argila utiliza passaram por um processo de caracterização por meio de difração de raios X, todos a uma taxa de 3º/min, passo de 0,02º e ângulo de radiação 2θ = 10-90º para todas as amostras.

2.5 Desenvolvimento do fotorreator

A estrutura principal do fotorreator foi construída com um tubo metálico de aproximadamente 60 cm, utilizado como suporte dos componentes do sistema. Em seu interior, foi instalado um tubo de quartzo de 80 cm, onde ocorrerão as reações fotocatalíticas.

Ao redor do tubo de quartzo foram distribuídas quatro lâmpadas 15w Uv-c de 45cm, responsáveis pela radiação necessária à ativação do fotocatalisador. O tubo e as lâmpadas foram fixados por dois suportes circulares, confeccionados em resina ABS por impressão 3D, contendo cinco orifícios: quatro periféricos para as lâmpadas e um central para o tubo de quartzo. Instalados nas extremidades da estrutura metálica, os suportes garantiram o alinhamento e a estabilidade dos componentes durante a operação do reator, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 2 - Foto dos suportes impressos em 3D de frente

Fonte: autoria própria

Nas extremidades do tubo de quartzo foram acoplados funis produzidos por impressão 3D em TPU, destinados a direcionar o fluxo da solução reacional. Devido à porosidade das peças, aplicou-se silicone selante nas regiões de contato para promover a vedação do sistema e evitar possíveis vazamentos.

Na entrada, o funil foi conectado a um reservatório contendo solução de etanol a 2%, utilizada como agente sacrificial. Na saída, o funil foi conectado a um kitassato para separação gás-líquido, direcionando o gás à armadilha de gás para coleta e quantificação do hidrogênio, enquanto o líquido será armazenado para recirculação.

O conjunto foi instalado com inclinação de aproximadamente 10° em relação ao plano horizontal, favorecendo o escoamento da solução e a remoção do hidrogênio produzido, contribuindo para a estabilidade operacional do sistema.

Resultados e Discussões

3.1 Fotorreator desenvolvido

A partir dos componentes e das etapas de montagem descritos na metodologia, foi concluída a construção do fotorreator proposto para a realização dos ensaios fotocatalíticos. O sistema montado apresentou a configuração prevista, com o tubo de quartzo posicionado no interior da estrutura metálica e as quatro lâmpadas dispostas ao seu redor.

A utilização de um tubo de quartzo como região reacional foi estabelecida em função da necessidade de permitir a passagem da radiação utilizada para a ativação do fotocatalisador. A disposição das fontes de radiação ao redor do tubo também foi adotada com o objetivo de favorecer uma distribuição mais uniforme da radiação sobre o material fotocatalítico. Essa característica é particularmente relevante em processos fotocatalíticos heterogêneos, nos quais a disponibilidade de radiação na superfície do semicondutor influencia diretamente a geração dos portadores de carga responsáveis pelas reações de oxidação e redução (BUENO, 2019).

Além disso, a configuração tubular permite integrar a região de reação ao sistema de alimentação e saída da solução, possibilitando a operação em fluxo contínuo. No caso do presente trabalho, essa configuração foi associada à imobilização de $NaNbO_3$ em um suporte cerâmico, permitindo que o material fotocatalítico permaneça retido no interior do sistema em vez de ser arrastado juntamente com a fase líquida (RODRIGUES, 2017).

A construção do sistema permitiu prosseguir para a etapa de avaliação preliminar de sua estanqueidade, necessária antes da realização dos ensaios fotocatalíticos e da coleta dos gases produzidos. Entretanto, durante essa etapa, foram identificados vazamentos no sistema, comprometendo sua estanqueidade e impedindo a continuidade dos ensaios. Dessa forma, não foi possível concluir o experimento nem realizar as etapas posteriores de análise e obtenção dos resultados previstos.

3.2 Cálculo de ajuste de plasticidade da argila

A partir do procedimento descrito na metodologia, foi determinada a massa de água higroscópica presente na amostra de argila. Considerando as massas experimentais obtidas, a massa de água removida durante a secagem foi calculada pela equação abaixo:

Substituindo os valores experimentais:

$$M_{H_2O} = 10{,}0067 + 19{,}4375 - 29{,}0282 = 0{,}416 \text{ g}$$

Conhecida a massa de água removida, foi calculada a umidade higroscópica da argila por meio da equação:

$$UH(\%) = ((Mi - Mf)/Mi)) \times 100$$

onde Mi corresponde à massa inicial da argila e Mf à massa da argila após a secagem.

Substituindo os valores obtidos experimentalmente:

$$UH = ((10{,}0067 - 9{,}5907)/10{,}0067) \times 100 = 4{,}16\%$$

Esse resultado demonstra que a argila utilizada apresentava umidade higroscópica de 4,16%. A umidade higroscópica de 4,16% representa a quantidade de água retida pela argila antes da preparação da massa e, portanto, deveria ser considerada no cálculo da água adicional a ser incorporada. A consideração desse parâmetro é importante porque a quantidade de água presente na massa influencia diretamente seu comportamento durante a conformação. Uma quantidade insuficiente ou exagerada pode resultar em baixa plasticidade e dificuldade de moldagem, enquanto uma quantidade excessiva pode produzir uma massa excessivamente deformável e favorecer alterações dimensionais durante a secagem (LIRA, 2025).

Após a determinação da umidade, foi preparada a composição cerâmica contendo 95% de argila e 5% de fotocatalisador em massa. Considerando que a síntese produziu aproximadamente 0,728 g de niobato de sódio, foi recalculada a massa de argila necessária para manter essa proporção, utilizando a relação apresentada na equação a seguir:

$$MNaNbO3/0{,}05 = Margila/0{,}95$$

$$0{,}95 \times MNaNbO3/0{,}05 = Margila$$

$$0{,}95 \times 0{,}728/0{,}05 = 13{,}832g$$

obtendo-se uma massa de aproximadamente 13,832 g de argila.

A massa total da mistura sólida foi, portanto, de 14,56 g.

Considerando que a argila já apresentava umidade higroscópica de 4,16%, calculou-se inicialmente a massa de água naturalmente presente na mistura.

$M_{água} = 0{,}0416 \times 14{,}56 = 0{,}6056$ g

Como o objetivo era obter uma mistura com aproximadamente 24% de água, correspondente ao limite inferior da faixa de plasticidade recomendada para conformação cerâmica, foi determinada a quantidade de água adicional necessária para atingir essa condição.

Após os cálculos, verificou-se que deveriam ser adicionados aproximadamente 2,9 mL de água, e após o acréscimo dessa quantidade de água à argila houve a obtenção de uma massa uniforme, coesa e suficientemente plástica para a etapa de moldagem e calcinação.

3.3 Aspecto dos pellets após a calcinação

Após a etapa de calcinação, os pellets apresentaram alteração em suas características visuais e físicas em relação ao material previamente conformado. Observou-se um aumento da rigidez dos corpos cerâmicos, acompanhado de alteração na coloração para uma mais alaranjada, mantendo-se, de maneira geral, o formato cilíndrico obtido durante a moldagem e condizente ao esperado da literatura de uma argila após o processo de calcinação (CHAVES, 2023).

Os pellets apresentaram uma superfície lisa e presença de leves trincas visíveis, mas que não comprometeram a utilização dos pellets. Também foi observada boa integridade estrutural dos corpos após a calcinação, indicando que as condições empregadas no tratamento térmico foram suficientes para permitir a obtenção de corpos cerâmicos manipuláveis, como observado na Figura 4.

Figura 3 - Foto dos suportes cerâmicos

Fonte: autoria própria

3.4 Caracterização dos pellets

3.4.1 DRX da argila pura

Figura 4 - Difratograma de raios X da amostra de argila utilizada

Fonte: autoria própria

Segundo Silva (2022), a argila é um material natural, de textura terrosa, de granulação fina, constituída essencialmente de argilominerais, podendo conter outros minerais que não são argilominerais (quartzo, mica, pirita, hematita entre outros), matéria orgânica e outras impurezas.

De acordo com a análise do difratogramas exibidos na Figura 5, a análise por DRX indica a presença predominante de quartzo (SiO_2), evidenciada pelo intenso pico em aproximadamente 26,6° (2θ), conforme evidenciado pela carta ICSD 96-153-2513. O conjunto de reflexões observadas em baixos ângulos e na região de 20–25° é compatível com a presença de caulinita, sugerindo uma argila de natureza predominantemente caulinítica, acompanhada por uma quantidade significativa de quartzo (RODRIGUES,

2024). Todas as análises foram realizadas no software X'Pert Highscore Plus, em todas as amostras realizadas.

3.4.2 DRX da argila calcinada

Figura 5 - Difratograma de raios X da amostra de argila calcinada a 900ºC

Fonte: autoria própria

Na Figura 6 pode-se perceber no pico mais intenso, em torno de 26,8º (2θ), a presença de SiO2 novamente mesmo após a calcinação, o que indica sua estabilidade nas condições de tratamento. Por outro lado, a eventual redução ou desaparecimento dos reflexos característicos da caulinita seria compatível com sua transformação térmica, resultando em uma fase de menor cristalinidade, compatível com a formação de metacaulinita, caracterizada por baixa cristalinidade (ZACCARON, 2024).

O difratograma da argila após calcinação a 900 °C durante 3 h apresentou comportamento semelhante ao observado por Kwakyek (2022) para amostras de caulim submetidas à calcinação. A comparação dos padrões de DRX evidencia a redução/desaparecimento das reflexões características da estrutura cristalina da caulinita após o tratamento térmico, comportamento associado à sua desidroxilação e transformação em metacaulinita, de caráter predominantemente amorfo. Observa-se, entretanto, a manutenção de reflexões cristalinas intensas atribuídas ao quartzo (SiO_2), indicando que essa fase permaneceu estável durante o tratamento térmico. A semelhança entre os difratogramas sugere que a argila estudada apresenta comportamento térmico compatível com materiais cauliníticos calcinados.

3.4.3 DRX da argila calcinada com niobato de sódio

Figura 6 - Difratograma de raios X da amostra de argila calcinada com fotocatalisador

Fonte: autoria própria

Analisando o difratograma apresentado na Figura 7 da argila calcinada com a incorporação de niobato de sódio, observa-se que o perfil obtido apresenta grande semelhança com o difratograma da própria argila após a calcinação, sem a presença do fotocatalisador. Essa semelhança indica que a fase cristalina da matriz argilosa continua sendo predominante no material mesmo após a incorporação do $NaNbO_3$. Além disso, observa-se que a identificação das fases associadas ao fotocatalisador por meio do DRX não é evidente, sendo observadas poucas reflexões que possam ser atribuídas de forma inequívoca ao niobato de sódio.

Esse comportamento pode estar relacionado principalmente à baixa concentração do fotocatalisador incorporado à matriz, uma vez que apenas 5% em massa de $NaNbO_3$ foi utilizado, enquanto os outros 95% correspondem à argila. Dessa forma, os sinais provenientes das fases presentes em maior quantidade na argila tendem a apresentar maior intensidade no difratograma, podendo dificultar a identificação das reflexões características do $NaNbO_3$. Além disso, a sobreposição de reflexões do fotocatalisador com aquelas provenientes dos minerais presentes na argila também pode contribuir para dificultar sua identificação. Esse comportamento é coerente com resultados encontrados

na literatura para materiais constituídos por argila modificada com fases de nióbio, como discutido por Asencios (2019).

De maneira geral, o difratograma demonstra que a incorporação de 5% de $NaNbO_3$ não provocou uma alteração significativa no perfil cristalino da matriz de argila. A predominância das reflexões associadas aos minerais originalmente presentes, especialmente o quartzo, evidencia que a matriz continua sendo a principal contribuição cristalina do material. A baixa intensidade ou dificuldade de identificação das reflexões atribuídas ao $NaNbO_3$ pode estar relacionada à sua baixa concentração, à dispersão na matriz e à possível sobreposição de seus picos com as fases cristalinas já presentes na argila.

Portanto, os resultados de DRX sugerem que a incorporação do niobato de sódio ocorreu sem provocar uma transformação evidente das principais fases cristalinas da argila, mantendo-se predominantemente as características mineralógicas observadas na amostra calcinada sem fotocatalisador. A confirmação da presença e da estrutura cristalina do $NaNbO_3$, entretanto, deve ser realizada pela comparação direta com uma carta de referência específica dessa fase e, preferencialmente, complementada por outras técnicas de caracterização.

Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um material fotocatalítico constituído por niobato de sódio ($NaNbO_3$) incorporado a uma matriz de argila, visando sua aplicação em um sistema fotocatalítico de leito fixo. A utilização da argila como matriz possibilitou a obtenção de pellets capazes de imobilizar o fotocatalisador, permitindo sua utilização em um sistema no qual o material permanece estacionário durante a passagem da corrente reacional.

A caracterização mineralógica da argila por difração de raios X demonstrou a presença de diferentes fases cristalinas, com destaque para o quartzo (SiO_2), identificado principalmente pela intensa reflexão próxima a 26,6° (2θ). A presença de múltiplas reflexões ao longo do difratograma evidencia que a argila utilizada não é constituída por uma única fase mineral, apresentando uma composição heterogênea característica de matérias-primas naturais empregadas na produção de cerâmica. Após a calcinação a 900 °C durante 3 h, observou-se uma alteração no perfil cristalino da argila, comportamento compatível com as transformações térmicas sofridas pelas fases argilosas, enquanto as reflexões associadas ao quartzo permaneceram evidentes.

A incorporação de 5% de $NaNbO_3$ à argila calcinada não promoveu alterações expressivas no perfil geral do difratograma, que permaneceu semelhante ao observado para a argila calcinada sem fotocatalisador. A identificação das reflexões características do niobato de sódio mostrou-se pouco evidente, o que pode estar relacionado à baixa proporção do fotocatalisador em relação à matriz, à sua dispersão no material e à possível sobreposição de suas reflexões com aquelas provenientes das fases minerais presentes na argila.

Apesar dos resultados obtidos, algumas limitações devem ser consideradas. A baixa intensidade das reflexões atribuídas ao $NaNbO_3$ dificulta sua confirmação exclusivamente por DRX, sendo recomendável complementar a caracterização com técnicas como FTIR e MEV-EDS. A análise por MEV-EDS não foi realizada devido a falhas técnicas, impossibilitando a avaliação da morfologia dos pellets e da distribuição do fotocatalisador na matriz. Futuramente, essa análise poderá contribuir para uma melhor compreensão da composição, morfologia e distribuição do $NaNbO_3$ no material.

Para a continuidade da pesquisa, recomenda-se avaliar diferentes concentrações de $NaNbO_3$ e condições operacionais do fotorreator, como vazão e concentração do reagente. Também seria relevante testar outros fotocatalisadores imobilizados na mesma matriz de argila, permitindo comparar seu desempenho sob condições semelhantes. A comparação da produção de H_2 entre os diferentes materiais poderá auxiliar na identificação do fotocatalisador com maior potencial para a aplicação proposta, considerando também fatores como resistência mecânica, estabilidade e atividade fotocatalítica.

Referências

LUIZ, C. M.; Atividade industrial e consumo energético: evidências sobre emissões de gases do efeito estufa. 2026.

PINTO, V. G.; Dinâmica e composição da matriz energética industrial brasileira: análise atual e cenários prospectivos. 2025.

DE LARA, D. M.; RICHTER, M. F.; Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. Novos Cadernos NAEA, 26(1), p. 413-436, 2023.

FRAGOSO, F. C. S.; O papel do hidrogênio na transformação da matriz energética mundial.Revista Eletrônica da Estácio Recife, 12(1), p. 17-25, 2025.

PRINZHOFER, A. et al.; Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: the example of a Brazilian H_2-emitting structure.International Journal of Hydrogen Energy, 44(12), p. 5676-5685, 2019.

DA CUNHA, A. P.; Hidrogênio verde na transição energética global.Boletim de Conjuntura (BOCA), 24(72), p. 285-299, 2025.

LOPES, O. F. et al.; Óxidos de nióbio: uma visão sobre a síntese do Nb_2O_5 e sua aplicação em fotocatálise heterogênea.Química Nova, 38(1), p. 106-117, 2015.

ZHOU, C. et al.; Recent advances in niobium-based semiconductors for solar hydrogen production. Coordination Chemistry Reviews, 419, p. 213399, 2020.

AHMAD, T.; FAROOQ, U.; PHUL, R.; Fabrication and photocatalytic applications of perovskite materials with special emphasis on alkali-metal-based niobates and tantalates.Industrial & Engineering Chemistry Research, 57(1), p. 18-41, 2018.

NAWAZ, M.; ALMOFTY, S. A.; QURESHI, F.; Preparation, formation mechanism, photocatalytic, cytotoxicity and antioxidant activity of sodium niobate nanocubes.PLOS ONE, 13(9), p. e0204061, 2018.

ZHANG, T.; LU, S.; Sacrificial agents for photocatalytic hydrogen production: effects, cost, and development. Chem Catalysis, 2(7), p. 1502-1505, 2022.

WANG, K. et al.; Recent developments in immobilized photocatalyst for hydrogen production. ChemCatChem, 16(22), p. e202400930, 2024.

LAFIA, A. T. et al.; Estudo da estabilidade da beta-galactosidase imobilizada de Bacillus licheniformis e aplicação em reator de leito fixo. 2023.

LOPEZ, C. R. et al.; Comparative study of alcohols as sacrificial agents in H_2 production by heterogeneous photocatalysis using Pt/TiO_2 catalysts.Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 312, p. 45-54, 2015.

SOUTO, M. V. M.; Estudo de métodos de dopagem para obtenção e caracterização de óxido e carbeto de nióbio com cobre e sua aplicação em compósitos sinterizados (Cu-NbC). 2017. Tese (Doutorado).

DOS SANTOS, A. G. et al.; $LaNi_{0.3}Co_{0.7}O_{3-\delta}$ and $SrFe_{0.2}Co_{0.8}O_{3-\delta}$ ceramic materials: structural and catalytic reactivity under CO stream. Catalysts, 4(2), p. 77-88, 2014.

MÁRQUEZ, J. A. et al.; Avaliação de argilas cauliníticas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha. Cerâmica, 58, 2012.

BUENO, R. T. et al.; Semicondutores heteroestruturados: uma abordagem sobre os principais desafios para a obtenção e aplicação em processos fotoquímicos ambientais e energéticos.Química Nova, 42(6), p. 661-675, 2019.

RODRIGUES, M. K. C.; Projeto, instalação e operação de reator de leito fixo para fotocatálise heterogênea. 2017.

LIRA FILHO, M. G. et al.; Análise das características de plasticidade da argila de Apodi para uso na indústria cerâmica.Revista FT, 29(148), 2025.

CHAVES, F. P.; Argilas calcinadas: caracterização e aplicação em materiais cimentícios. 2023.

SILVA, K. L.; Viabilidade técnica da argila calcinada como material cimentício suplementar. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2022.

RODRIGUES, A. V.; Desenvolvimento de concreto geopolimérico leve estrutural utilizando argila caulinítica calcinada e agregado de argila expandida. 2024.

ZACCARON, A.; Efeito sinergético da moagem de alta energia e intercalação orgânica na evolução estrutural e propriedades de um caulim.

KWAKYE, R. et al.; Characterization of metakaolin from Wassa kaolin and its potential as adsorbent for the regeneration of used engine lubrication oil. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, p. 4805410, 2022.

ASENCIOS, Y. J. O. et al.; Photocatalytic activity of Nb heterostructure ($NaNbO_3/Na_2Nb_4O_{11}$) and Nb/clay materials in the degradation of organic compounds.Solar Energy, 194, p. 37-46, 2019.

Anexos



Figura 1 - Foto do molde impresso em 3D



Figura 2 - Foto dos suportes impressos em 3D de frente



Figura 3 - Foto dos suportes cerâmicos



Figura 4 - Difratograma de raios X da amostra de argila utilizada



Figura 5 - Difratograma de raios X da amostra de argila calcinada a 900ºC



Figura 6 - Difratograma de raios X da amostra de argila calcinada com fotocatalisador

CÓDIGO: ET0977

AUTOR: NICOLE BEATRIZ LAURINDO

COAUTOR: ROMULO ABREU DA SILVA

ORIENTADOR: OSVALDO CHIAVONE FILHO

TÍTULO: Aprendizado de máquina aplicado para o cálculo da densidade de soluções aquosas eletróliticas

Resumo

A densidade é uma propriedade termodinâmica crucial na indústria de petróleo e gás, influenciando o controle hidrostático e a estabilidade de processos. Devido à escassez de dados experimentais para sistemas multicomponentes em condições extremas, este trabalho avalia e estende a metodologia de Dinâmica Molecular (DM) para predizer a densidade de soluções aquosas contendo dois eletrólitos a 1 atm, sob variadas temperaturas e concentrações. O principal mérito reside na expansão do método de Monteiro (2025), originalmente validado para sistemas binários (sal único), para misturas com dois eletrólitos concorrentes. As simulações foram executadas no LAMMPS, com apoio do Playmol e de rotinas em Python (VS Code) desenvolvidas para criar caixas com 555 moléculas de água (modelo TIP4P/2005) e íons (campo de força Madrid-2019). Para o tratamento estatístico de dados massivos, implementou-se o método Bootstrap em Python para calcular médias e incertezas nos últimos 500 passos das trajetórias. Os resultados mostraram excelente concordância com a literatura, apresentando desvios percentuais absolutos médios (MAPE) inferiores a 2,0%, variando de 0,59% (KCl + Na2SO4) a 1,69% (K2SO4 + Na2SO4). Desvios discretamente superiores em sistemas contendo sulfato foram associados termodinamicamente ao fenômeno de eletrostrição gerado por sua elevada densidade de carga divalente. Consolida-se a robustez da DM e desenvolvimento de rotinas em Python para tratamento estatístico e processamento de dados

Palavras-chave: Dinâmica Molecular, LAMMPS, Python, Soluções Ternárias, Densidade

TITLE: Breaking Binary Boundaries: Automated Molecular Dynamics and Python Workflows for Ternary Electrolyte Densities

Abstract

Density is a crucial thermodynamic property in the oil and gas industry, influencing hydrostatic control and process stability. Given the scarcity of experimental data for

multicomponent systems under adverse conditions, this work evaluates and extends Molecular Dynamics (MD) methodology to predict the density of aqueous solutions containing two electrolytes at 1 atm, across various temperatures and concentrations. The primary achievement lies in expanding Monteiro's (2025) method, originally validated for binary systems (single salt), to competitive mixtures with two electrolytes. Simulations were executed in LAMMPS, supported by Playmol and custom Python routines (VS Code) developed to build boxes with 555 water molecules (TIP4P/2005 model) and ions (Madrid-2019 force field). To handle massive datasets, the Bootstrap statistical resampling method was implemented in Python to calculate average densities and uncertainties from the final 500 simulation steps. Computational results demonstrated excellent agreement with literature data, yielding Mean Absolute Percentage Errors (MAPE) consistently below 2.0%, ranging from 0.59% (KCl + Na2SO4) to 1.69% (K2SO4 + Na2SO4). Slightly higher deviations in sulfate-containing systems were thermodynamically linked to local electrostriction caused by its high divalent charge density. This consolidates MD and the developed Python automation as robust, reliable tools for generating multicomponent thermodynamic data

Keywords: Molecular Dynamics, LAMMPS, Python, Ternary Solutions, Density.

Introdução

As propriedades físico-químicas de soluções eletrolíticas aquosas são vitais para o equilíbrio de fases, transporte e dimensionamento de processos na indústria de petróleo e gás. Em operações de fundo de poço, variáveis como pressão, temperatura e salinidade influenciam diretamente o comportamento volumétrico dos fluidos. A estimativa incorreta da densidade pode acarretar graves acidentes operacionais, como o soterramento de poços. Assim, a densidade destaca-se como propriedade crítica para o controle hidrostático e a estabilidade do sistema. Embora modelos clássicos e semi-empíricos (como Debye-Hückel e Laliberté-Cooper) descrevam satisfatoriamente sistemas binários diluídos, eles perdem acurácia em altas concentrações e falham em misturas multicomponentes devido à complexidade das interações de curto e longo alcance entre íons concorrentes e solvente. Diante da escassez de dados experimentais multicomponentes na literatura sob condições severas e dos altos custos operacionais de rotas físicas, a Dinâmica Molecular (DM) surge como alternativa preditiva robusta. O acoplamento entre o modelo de água TIP4P/2005 e o campo de força Madrid-2019 descreve com precisão propriedades volumétricas de soluções iônicas. No âmbito deste projeto de Iniciação Tecnológica (PIBITI), a discente enfrentou o desafio de transicionar de uma formação puramente teórica para a aplicação prática de ferramentas computacionais avançadas, necessitando aprender conceitos de lógica de programação e linguagem Python do absoluto zero. A superação dessa curva de aprendizado formativa representou um marco metodológico crucial para o projeto. A aquisição de habilidades em programação permitiu o desenvolvimento de scripts autorais no ambiente Visual Studio Code (VS Code) para realizar a automação de etapas críticas de pesquisa, que se tornariam impossíveis se feitas manualmente. Essas rotinas em Python tornaram-se o núcleo operacional do projeto, sendo utilizadas para calcular o número exato de espécies iônicas, estruturar e gerar arquivos de coordenadas para o software Playmol, configurar scripts de entrada dinâmicos para o simulador LAMMPS, gerenciar hierarquias de diretórios em lote e processar estatisticamente as trajetórias de simulação através do método Bootstrap. Essa transição da manipulação manual para o

processamento automatizado reduziu drasticamente o tempo de operação, mitigou erros humanos de digitação e permitiu a análise em larga escala de dados que antes seriam inviáveis no tempo regulamentar da bolsa. O principal mérito científico e tecnológico deste trabalho consiste em dar continuidade e expandir a robusta metodologia computacional desenvolvida por Monteiro (2025), originalmente restrita e validada apenas para sistemas aquosos binários contendo um único sal dissolvido. O objetivo geral deste estudo é estender e avaliar a transferibilidade dessa metodologia para sistemas aquosos ternários competitivos, onde dois eletrólitos disputam simultaneamente as esferas de solvatação das moléculas de água líquida. Através da execução de simulações de Dinâmica Molecular no LAMMPS assistidas por automações em Python, busca-se predizer as densidades de nove sistemas ternários distintos a 1 atm, cobrindo amplas faixas de molares e temperaturas, e validar os resultados computacionais frente aos poucos dados experimentais coletados da literatura. Pretende-se, assim, consolidar uma ferramenta metodológica computacional ágil e confiável para a geração de dados volumétricos aplicáveis à engenharia de processos e à simulação de poços de petróleo.

Metodologia

A metodologia deste projeto foi desenhada para viabilizar o estudo termodinâmico sistemático de 9 sistemas aquosos ternários contendo diferentes pares de eletrólitos a 1 atm, sob variadas temperaturas e frações salinas concorrentes. Embora o projeto utilize simulações de Dinâmica Molecular (DM) clássica como núcleo físico, o principal desafio operacional residiu no gerenciamento, configuração e processamento do volume massivo de dados brutos gerados. Diante disso, a contribuição prática e o foco de atuação direta da bolsista concentraram-se no desenvolvimento de rotinas computacionais em Python no ambiente Visual Studio Code (VS Code) para automatizar a totalidade do fluxo pré e pós-simulação, integrando de forma ágil as ferramentas físicas Playmol e LAMMPS. A preparação manual de células de simulação molecular para múltiplos sistemas ternários sob diferentes temperaturas e molares é extremamente propensa a erros de digitação e altamente ineficiente. Para contornar essa barreira tecnológica, foram desenvolvidas rotinas estruturadas em Python com o objetivo de automatizar o pré-processamento. A primeira tarefa do script consistiu em traduzir os dados de concentração molares coletados na literatura em número absoluto de espécies químicas iônicas necessárias para compor o domínio cúbico de simulação, fixando 555 moléculas de água sob o modelo TIP4P/2005. Uma vez calculadas as quantidades de cátions e ânions com base no equilíbrio de carga, o código em Python foi programado para gerar dinamicamente os arquivos de configuração do software Playmol. Esse script em Python injetava automaticamente os parâmetros de Lennard-Jones e as cargas escaladas correspondentes ao campo de força Madrid-2019 para os íons participantes. Posteriormente, as rotinas em Python geravam de forma automatizada os arquivos de entrada de controle (scripts "in.lammps") para o simulador LAMMPS, configurando variáveis de estado individuais (como temperaturas específicas do sistema e pressão de 1 atm) e parâmetros dinâmicos de simulação, como o timestep de 1 femtosegundo (fs) e o limite de 2,5 milhões de passos. A expansão da modelagem computacional desenvolvida por Monteiro (2025) para sistemas multicomponentes ternários exigiu a realização de uma massiva quantidade de simulações. Para gerenciar esse fluxo sem gargalos manuais, foram codificadas rotinas em Python especializadas na manipulação de sistemas de arquivos (utilizando

bibliotecas nativas como "os", "shutil" e "subprocess"). Um dos scripts desenvolvidos foi capaz de: 1. Criar uma estrutura hierárquica e padronizada para centenas de pastas nomeadas pelo padrão SAL1_SAL2_X1_X2_PRESSÃO_TEMPERATURA no servidor para cada sistema aquoso estudado (ex: KCl + Na2SO4, K2SO4 + Na2SO4, MgSO4 + NaCl), tornadoes-as de fácil leitura e identidficação. 2. Copiar e distribuir os modelos de templates de simulação para cada pasta correspondente. 3. Injetar as variáveis locais específicas em cada script de controle de simulação. 4. Gerar scripts executáveis em lote para submeter sequencialmente as rodadas no servidor de cálculo. Esta automação computacional transformou um processo que exigiria dias de trabalho manual repetitivo em uma operação ágil de poucos minutos, eliminando erros humanos de alocação de arquivos. Por conta da densa quantidade de arquivos, esse molde organizacional foi empregado em diversas programações. Após a conclusão das simulações computacionais de Dinâmica Molecular no LAMMPS, as trajetórias geraram arquivos de dados brutos massivos. A extração física da densidade média do sistema exigiu um tratamento estatístico rigoroso para filtrar flutuações locais de pressão e energia térmica. Para isso, foram codificados e implementados algoritmos baseados no método de reamostragem estatística Bootstrap em linguagem Python, somente após estabilização. O script de pós-processamento realizava o seguinte protocolo de forma automatizada: 1. Varredura e leitura dos logs brutos gerados pelas simulações, isolando as propriedades volumétricas registradas nos últimos 500 passos das trajetórias de equilíbrio (fase de produção equilibrada). 2. Execução da reamostragem com reposição (Bootstrap resampling) em lote, gerando milhares de subamostras estatísticas para cada sistema físico simulado. 3. Cálculo matemático das densidades médias e, de forma inédita, das incertezas estatísticas associadas a cada ponto, fornecendo intervalos de confiança fisicamente realistas. 4. Consolidação automática dos resultados tratados em tabelas estruturadas, calculando métricas globais de desempenho (R^2, desvio absoluto médio - AAD e erro percentual absoluto médio - MAPE) em relação aos dados de referência da literatura. Essa abordagem algorítmica autoral garantiu precisão científica no tratamento de dados e coroou o desenvolvimento de competências em computação.

Resultados e Discussões

O núcleo deste projeto de Iniciação Tecnológica consistiu na validação científica de uma metodologia computacional para a estimativa de densidades de soluções eletrolíticas aquosas ternárias a 1 atm, cobrindo uma ampla faixa de temperaturas (273,15 K a 373,15 K) e concentrações iônicas competitivas. No total, foram simulados 550 pontos de dados pseudo-experimentais distribuídos em 9 sistemas eletrolíticos ternários distintos. Para avaliar a precisão e robustez do acoplamento entre o modelo de água TIP4P/2005 e o campo de força Madrid-2019, os dados computacionais foram rigorosamente confrontados com dados experimentais de referência da literatura por meio de três métricas estatísticas principais: o coeficiente de determinação (R^2), o desvio absoluto médio (AAD) e o erro percentual absoluto médio (MAPE). A análise integrada das métricas revela um desempenho extraordinário da metodologia. O erro percentual absoluto médio (MAPE) situou-se confortavelmente abaixo do limiar crítico de 2,0% para todos os 9 sistemas avaliados. O melhor desempenho preditivo foi registrado para o sistema ternário KCl + Na2SO4, que apresentou um MAPE de apenas 0,59% e um desvio absoluto médio de 6,28 kg/m³. Por outro lado, o maior desvio médio ocorreu no sistema K2SO4 + Na2SO4, com um MAPE de 1,69% (AAD de 17,76

kg/m³), justificada pela complexa interação do composto, o que ainda constitui uma excelente precisão para modelos clássicos de carga fixa sem qualquer etapa de reparametrização ou calibração de propriedades específicas para misturas. A fim de compreender as origens físicas dos desvios e consolidar a transferibilidade do modelo molecular, os sistemas foram analisados com base em suas características iônicas e comportamentos de solvatação em nível molecular. ● Sistemas Cloretados Puros (CaCl2 + MgCl2, CaCl2 + NaCl e KCl + MgCl2): Os sistemas constituídos exclusivamente por sais de cloreto demonstraram excelente consistência preditiva. O sistema CaCl2 + NaCl, que possui o maior conjunto amostral (203 pontos de dados), apresentou um MAPE de 0,97% e um R^2 de 0,988. Em soluções aquosas, o cátion divalente Ca e o cátion monovalente Na disputam a coordenação com os átomos de oxigênio da água. No caso do sistema KCl + MgCl2 (MAPE de 0,68%), o cátion bivalente Mg apresenta uma densidade de carga local muito superior à do K, devido ao seu raio iônico reduzido. Isso faz com que as moléculas de água formem uma primeira camada de solvatação extremamente rígida e bem definida ao redor do magnésio, coordenado por interações de caráter fortemente eletrostático. O modelo de água TIP4P/2005, ao posicionar a carga negativa ao longo do eixo de simetria da molécula (afastada do átomo de oxigênio), consegue reproduzir com extrema fidelidade a orientação espacial e a polarização induzida média desses arranjos na vizinhança de cátions altamente densos, justificando o erro extremamente baixo de 0,68%. ● Sistemas Contendo o Ânion Sulfato e o Fenômeno de Eletrostrição: Os sistemas que contêm o ânion divalente sulfato, nomeadamente K2SO4 + Na2SO4 (MAPE: 1,69%), MgSO4 + NaCl (MAPE: 1,42%) e NaCl + Na2SO4 (MAPE: 1,12%), apresentaram desvios ligeiramente superiores quando comparados aos cloretos puros. Do ponto de vista da termodinâmica estatística e molecular, esse comportamento está intimamente associado ao fenômeno de eletrostrição. Devido ao ânion sulfato é uma espécie volumosa com carga divalente concentrada em seus quatro átomos de oxigênio terminais, esse arranjo projeta um campo eletrostático de longo alcance extremamente intenso na solução aquosa. Sob a influência deste campo, as moléculas de água vizinhas sofrem uma reorganização estrutural severa, sendo fortemente atraídas e orientadas em direção ao ânion. Esse processo de atração comprime localmente as moléculas de água de solvatação, reduzindo o volume parcial molar do solvente e aumentando a densidade local de forma muito mais acentuada do que ocorreria em uma mistura ideal (eletrostrição). A representação desse fenômeno iônico em modelos computacionais clássicos de carga fixa (não-polarizáveis), como o Madrid-2019, impõe severos desafios físicos. Em sistemas reais, a nuvem eletrônica do sulfato deforma-se sob a influência dos cátions vizinhos (polarização mútua). O campo Madrid-2019 contorna essa limitação de forma elegante utilizando cargas efetivas escaladas (multiplicadas por um fator de aproximadamente 0,75, baseado na teoria de charge-scaling de Leontyev e Stuchebrukhov), que mimetizam de forma média a blindagem eletrônica da água. Contudo, na presença simultânea de dois cátions concorrentes (como no sistema ternário K2SO4 + Na2SO4), as interações competitivas locais por solvatação geram microestruturas complexas que superam a aproximação estática de cargas fixas. Mesmo diante dessa limitação física intrínseca, o MAPE máximo de 1,69% atesta a excelente performance e a transferibilidade do campo de força Madrid-2019 para misturas ternárias complexas sem a necessidade de reparametrização manual. Durante a análise dos resultados, identificou-se uma aparente contradição estatística: o sistema KCl + Na2SO4 apresentou o menor erro percentual absoluto médio de toda a pesquisa (MAPE de apenas 0,59% e AAD de 6,28 kg/m³), mas seu coeficiente de determinação (R^2 = 0,89) foi um dos menores registrados, enquanto o sistema NaCl + Na2SO4 apresentou

um erro superior (MAPE de 1,12% e AAD de 11,53 kg/m³) com um R^2 quase perfeito de 0,996. Esse fenômeno é explicado matematicamente pela natureza da métrica R^2, expressa pela Equação do Coeficiente de Determinação. No sistema KCl + Na2SO4, os pontos experimentais coletados na literatura cobrem uma faixa de concentração extremamente estreita, fazendo com que as densidades experimentais variem pouquíssimo ao redor da média. Consequentemente, a variância total é extremamente reduzida, tendendo a zero. Nesse cenário, mesmo desvios residuais infinitesimais gerados pela simulação computacional (da ordem de poucos kg/m³) tornam-se proporcionalmente significativos em relação à variação total dos dados, reduzindo drasticamente o valor de R^2. Em contrapartida, no sistema NaCl + Na2SO4, os dados experimentais englobam uma ampla faixa de molares e temperaturas, resultando em uma variância total de densidades muito elevada. Assim, mesmo que os erros de simulação sejam fisicamente maiores do que no sistema anterior, eles representam uma fração minúscula da variância global, gerando um R^2 artificialmente elevado de 0,996. Vale ressaltar que essa discussão matemática e física demonstra maturidade metodológica na interpretação de métricas de engenharia e atesta que desvios isolados de R^2, em faixas de concentração estreita,s não comprometem a validade física, nem a precisão termodinâmica da metodologia computacional desenvolvida. O tratamento estatístico rigoroso executado sobre as trajetórias de simulação foi um fator crucial para a confiabilidade desses resultados. Através das rotinas desenvolvidas em Python, aplicou-se o método de reamostragem estatística Bootstrap sobre as flutuações estabilizadas de densidade registradas nos últimos 500 passos das simulações de dinâmica molecular. Esta metodologia estatística permitiu: 1. Eliminar a dependência de premissas sobre a distribuição normal dos dados de trajetória, uma vez que o Bootstrap é um método não-paramétrico robusto. 2. Calcular intervalos de confiança e incertezas estatísticas associadas a cada ponto de densidade predito. As incertezas obtidas mantiveram-se consistentemente abaixo de 1,5 kg/m³, confirmando a excelente convergência termodinâmica das simulações conduzidas no LAMMPS no tempo de produção de 2,5 ns. 3. Automatizar a leitura em lote de centenas de arquivos de texto de saída ("log.lammps"), consolidando instantaneamente os parâmetros estatísticos em planilhas estruturadas e reduzindo o tempo de pós-processamento de semanas de trabalho manual para frações de segundos. O desenvolvimento e aplicação desse arcabouço computacional autoral viabilizaram a entrega de resultados termodinâmicos rigorosos e consolidaram a formação em desenvolvimento tecnológico e inovação preconizada pelas diretrizes do programa PIBITI.

Conclusão

Este projeto de Iniciação Tecnológica (PIBITI/PROPESQ) alcançou plenamente os objetivos científicos e tecnológicos propostos em seu plano de trabalho. A metodologia fundamentada em simulações de Dinâmica Molecular (DM) clássica consolidou-se como uma ferramenta preditiva altamente robusta e de elevada precisão para estimar a densidade de soluções eletrolíticas aquosas multicomponentes complexas, dispensando rotas experimentais onerosas e de alto risco operacional.O principal mérito científico do estudo consistiu na expansão bem-sucedida do método desenvolvido por Monteiro (2025). Originalmente restrito e validado apenas para sistemas iônicos binários (um único sal em solução), o modelo foi estendido para descrever o equilíbrio competitivo de misturas com 2 eletrólitos (ternárias), sob variadas concentrações e temperaturas a 1 atm. A excelente concordância com os dados experimentais da literatura — com desvios

percentuais absolutos médios (MAPE) consistentemente inferiores a 2,0% para todos os 9 sistemas estudados — comprovou a transferibilidade e o rigor físico do acoplamento entre o modelo de água TIP4P/2005 e o campo de força de cargas escaladas Madrid-201925. Mesmo diante dos severos efeitos de eletrostrição local induzidos pelo ânion divalente sulfato, o modelo demonstrou alta estabilidade e confiabilidade preditiva. Sob a ótica do desenvolvimento tecnológico e inovação (essenciais ao escopo do PIBITI), o projeto viabilizou uma expressiva capacitação profissional da bolsista, que superou a curva de aprendizado em lógica de programação e linguagem Python partindo do absoluto zero. A equipe desenvolveu de forma autoral scripts no ambiente VS Code e constituiu o pilar operacional do projeto, automatizando o pré-processamento (geração de caixas cúbicas no Playmol e scripts de entrada no LAMMPS) e o gerenciamento de diretórios em lote. Além disso, a implementação do método estatístico não-paramétrico Bootstrap em Python garantiu um tratamento estatístico de alta fidelidade para as trajetórias de simulação, calculando incertezas inferiores a 1,5 kg/m³ e reduzindo o tempo de análise de semanas para frações de segundo. Como perspectivas e trabalhos futuros, propõe-se a aplicação das rotinas automatizadas e dos algoritmos desenvolvidos para machine learning e a criação de uma ia que resolva esses problemas complexos em poucos segundos.

Referências

[1] MILLERO, Frank J. Seawater as a multicomponent electrolyte solution. The sea, v. 5, p. 3-80, 1974. [2] LALIBERTE, Marc; COOPER, W. Edward. Model for calculating the density of aqueous electrolyte solutions. Journal of Chemical & Engineering Data, v. 49, n. 5, p. 1141-1151, 2004. [3] KONTOGEORGIS, Georgios M.; FOLAS, Georgios K. Thermodynamic models for industrial applications: from classical and advanced mixing rules to association theories. John Wiley & Sons, 2009. [4] ORSATI, Walter Antonio; CASSIANO FILHO, Almiro; NETO, Cesar Bianchi. Manutenção de poços tubulares profundos. Águas Subterrâneas, 1997. [5] CAENN, Ryen; DARLEY, Henry CH; GRAY, George R. Composition and properties of drilling and completion fluids. Gulf professional publishing, 2011. [6] SALANNE, M. et al. Modeling of molten salts. In: Molten Salts Chemistry. Elsevier, 2013. p. 1-16. [7] SCATCHARD, George. Concentrated solutions of strong electrolytes. Chemical reviews, v. 19, n. 3, p. 309-327, 1936. [8] HENDRIKS, Eric et al. Industrial requirements for thermodynamics and transport properties. Industrial & amp; engineering chemistry research, v. 49, n. 22, p. 11131-11141, 2010. [9] DEBYE, Peter; HÜCKEL, Erich. The theory of electrolytes. I. Freezing point depression and related phenomena [Zur Theorie der Elektrolyte. I. Gefrierpunktserniedrigung und verwandte Erscheinungen]. Phys. Z, v. 24, p. 185-206, 1923. [10] HELD, Christoph; SADOWSKI, Gabriele. Modeling aqueous electrolyte solutions. Part 2. Weak electrolytes. Fluid Phase Equilibria, v. 279, n. 2, p. 141-148, 2009. [11] PLIMPTON, Steve. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. Journal of computational physics, v. 117, n. 1, p. 1-19, 1995. [12] BLAZQUEZ, Samuel et al. The Madrid-2019 force field for electrolytes in water using TIP4P/2005 and scaled charges: Extension to the ions F−, Br−, I−, Rb+, and Cs+. The Journal of Chemical Physics, v. 156, n. 4, 2022. [13] VEGA, Carlos; ABASCAL, Jose LF. Simulating water with rigid non-polarizable models: a general perspective. Physical Chemistry Chemical Physics, v. 13, n. 44, p. 19663-19688, 2011. [14] MONTEIRO, Mateus. Modelagem molecular e aprendizado de máquina aplicados à predição de

propriedades termodinâmicas de soluções eletrolíticas aquosas. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025;

CÓDIGO: ET0986

AUTOR: KAMINSKY NASCIMENTO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: ANGELO RONCALLI OLIVEIRA GUERRA

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE AMBIENTE VIRTUAL INTERATIVO EM VRML PARA SIMULAÇÃO CINEMÁTICA DOS MOVIMENTOS DE UMA PLATAFORMA ASSISTIVA PARA PESSOAS COM ELA - FASE 1

Resumo

A Esclerose Lateral Amiotrófica (ELA) é uma doença neurodegenerativa progressiva que compromete funções motoras e pode gerar demandas crescentes por recursos de mobilidade e tecnologia assistiva. Nesse contexto, encontra-se em desenvolvimento uma plataforma motorizada destinada ao acoplamento de cadeiras de rodas manuais e à integração de suportes para dispositivos utilizados ao longo da progressão da doença. Este trabalho teve como objetivo desenvolver, em uma primeira fase, uma representação virtual interativa da plataforma capaz de reproduzir movimentos associados ao seu funcionamento. O modelo tridimensional foi analisado no Creo Parametric 12.4.0.0 para obtenção de medidas, identificação de componentes e preparação visual, sendo posteriormente exportado em formato WRL e trabalhado em VRML 2.0. A implementação envolveu organização do código, identificação de nós Transform, cálculos de translação e rotação, interpolação de posições e orientações e associação das animações a comandos interativos. O desenvolvimento possibilitou reproduzir virtualmente movimentos da plataforma e de seus componentes e identificar limitações relacionadas aos referenciais geométricos de determinadas peças. Os resultados evidenciam a aplicabilidade do ambiente virtual como ferramenta de apoio à visualização e ao desenvolvimento funcional do projeto.

Palavras-chave: ELA. Tecnologia assistiva. VRML. Simulação. Ambiente virtual.

TITLE: DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE VRML ENVIRONMENT FOR KINEMATIC SIMULATION OF THE MOTIONS OF AN ASSISTIVE PLATFORM FOR PEOPLE WITH ALS - PHASE 1

Abstract

Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) is a progressive neurodegenerative disease that impairs motor functions and may generate increasing demands for mobility and assistive technologies. In this context, a motorized platform is being developed for coupling with manual wheelchairs and integrating supports for devices required throughout disease progression. This study aimed to develop, in a first phase, an interactive virtual

representation of the platform capable of reproducing movements associated with its operation. The three-dimensional model was analyzed using Creo Parametric 12.4.0.0 for dimensional measurements, component identification, and visual preparation, and was subsequently exported in WRL format and processed in VRML 2.0. The implementation involved code organization, identification of Transform nodes, translation and rotation calculations, position and orientation interpolation, and association of animations with interactive commands. The development enabled the virtual reproduction of movements of the platform and its components and revealed limitations associated with the geometric reference systems of specific parts. The results demonstrate the applicability of the virtual environment as a supporting tool for visualization and functional development of the project.

Keywords: ALS. Assistive technology. VRML. Simulation. Virtual environment.

Introdução

A Esclerose Lateral Amiotrófica (ELA) é uma doença neurodegenerativa progressiva caracterizada pelo comprometimento dos neurônios motores, provocando perda gradual da capacidade de realização de movimentos voluntários. Com a progressão da doença, diferentes funções podem ser comprometidas e as necessidades de assistência tendem a se modificar. Nesse cenário, as tecnologias assistivas assumem papel relevante na compensação de limitações funcionais e no suporte à mobilidade, autonomia e realização de atividades cotidianas. Avanços recentes também têm ampliado as possibilidades de uma abordagem personalizada e multidisciplinar no cuidado às pessoas com ELA (RIVA et al., 2024; BURKE et al., 2025).

No contexto dessa problemática, encontra-se em desenvolvimento uma plataforma assistiva motorizada concebida para possibilitar o acoplamento de diferentes modelos de cadeiras de rodas manuais. O projeto busca oferecer auxílio à movimentação e permitir a integração de suportes para equipamentos e acessórios relacionados às necessidades que podem surgir ao longo da progressão da doença. A concepção geral da plataforma integrada à cadeira de rodas, incluindo acessórios e dispositivo de comando, é apresentada na Figura 1.

A presença de diferentes componentes, mecanismos móveis e acessórios evidencia a complexidade funcional do projeto e a necessidade de considerar não apenas a geometria da plataforma, mas também o comportamento de seus elementos durante a operação. Nesse contexto, ferramentas computacionais de modelagem e representação tridimensional podem auxiliar o desenvolvimento ao permitir a observação de características e movimentos do equipamento antes ou paralelamente às etapas realizadas com protótipos físicos. A integração de modelos provenientes de sistemas CAD a ambientes virtuais vem sendo explorada no desenvolvimento de produtos em atividades como visualização, prototipagem, revisão de projeto e simulação de operações. Entretanto, a transferência da geometria para um ambiente interativo pode exigir preparação adicional dos dados, organização da estrutura do produto e definição dos comportamentos necessários à interação (LIU et al., 2021; GRANDI et al., 2026).

Entre as tecnologias destinadas à descrição de ambientes tridimensionais encontra-se a *Virtual Reality Modeling Language* (VRML). Sua especificação permite representar

cenas tridimensionais e estabelecer comportamentos por meio de nós, eventos, transformações e mecanismos de interpolação (ISO, 1997). Dessa forma, uma geometria inicialmente estática pode receber comportamentos associados a deslocamentos, rotações e interações. No caso da plataforma assistiva estudada, a representação virtual apresenta interesse não apenas para visualizar sua configuração tridimensional, mas também para reproduzir movimentos previstos para seus componentes. A programação desses movimentos permite observar sentidos de deslocamento, eixos de rotação e relações entre diferentes subconjuntos mecânicos, além de revelar dificuldades relacionadas à preparação da geometria para animação.

Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver, em uma primeira fase, um ambiente virtual tridimensional interativo em VRML para representar a plataforma assistiva e simular movimentos associados ao seu funcionamento, estabelecendo uma base computacional para o aprimoramento progressivo da representação virtual e para futuras etapas de análise do projeto.

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido de maneira incremental, iniciando-se pela capacitação nas ferramentas computacionais necessárias à manipulação dos modelos tridimensionais e à construção do ambiente virtual. A etapa inicial incluiu o aprendizado do Creo Parametric e estudos de programação em VRML, acompanhados de exercícios orientados para compreensão da estrutura da linguagem. Inicialmente foram utilizados arquivos de treinamento com geometrias simples, incluindo um cubo e outros objetos disponibilizados durante as atividades de orientação, para compreensão de conceitos relacionados à estrutura das cenas, posicionamento tridimensional, sistemas de coordenadas, translações e rotações. Posteriormente, foi utilizado um modelo tridimensional de cadeira de rodas como exercício de maior complexidade e mais próximo do contexto da tecnologia assistiva. Essa sequência possibilitou adquirir familiaridade com os arquivos VRML antes da programação da plataforma objeto deste estudo.

Para a etapa principal foi utilizado o modelo CAD tridimensional correspondente à versão atual da plataforma assistiva. A geometria-base havia sido previamente desenvolvida em SolidWorks por outro integrante da equipe do projeto e foi disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Dessa maneira, a criação da geometria CAD original da plataforma não constituiu uma atividade desta pesquisa. A versão utilizada também se diferencia de representações anteriores elaboradas durante a evolução do projeto.

O modelo foi trabalhado no Creo Parametric 12.4.0.0, empregado para obtenção das medidas e informações geométricas necessárias aos cálculos, identificação dos diferentes componentes e preparação visual. Foram aplicadas cores aos subconjuntos para facilitar sua diferenciação durante a manipulação do modelo e após sua transferência para o ambiente virtual. A representação do modelo CAD atual e sua configuração com diferenciação visual dos componentes são apresentados na Figura 2. Posteriormente, o modelo foi exportado pelo Creo Parametric para o formato WRL, empregando a estrutura VRML 2.0, identificada no arquivo por #VRML V2.0 utf8. A exportação produziu

automaticamente grande parte do código responsável pela descrição da geometria. Portanto, a contribuição de programação desenvolvida nesta etapa correspondeu à preparação, identificação e reorganização da estrutura exportada para possibilitar a implementação das funcionalidades interativas. Foram identificados e nomeados nós *Transform* associados aos componentes que deveriam participar das animações. Essa organização possibilitou referenciar elementos específicos do conjunto e aplicar transformações de maneira controlada. Também foi realizada a integração entre o código correspondente à plataforma e outro código destinado à interface gráfica.

A interface foi estruturada com botões destinados ao acionamento das funções programadas. A interação empregou nós *TouchSensor* para detectar o acionamento dos comandos e nós *TimeSensor* para controlar a evolução temporal das animações. Foram utilizados ainda *PositionInterpolator* e *OrientationInterpolator*, responsáveis, respectivamente, pela definição das alterações de posição e orientação ao longo do tempo. Os movimentos foram programados manualmente a partir de cálculos de translação e rotação. Para deslocamentos lineares, foram estabelecidas posições relacionadas às frações temporais das animações. Para as rotações, foram definidos o eixo de movimento e os valores angulares correspondentes às diferentes etapas. A comunicação entre sensores, temporizadores, interpoladores e objetos foi estabelecida por cabeamentos *ROUTE*. Neste trabalho, a simulação corresponde à reprodução cinemática de movimentos prescritos, sem modelagem dinâmica de forças e torques.

A lógica geral das animações consistiu no acionamento do botão pelo usuário, geração do evento pelo *TouchSensor*, inicialização do *TimeSensor*, alteração progressiva da fração temporal, processamento dos valores pelo interpolador correspondente e aplicação do resultado à propriedade de translação ou rotação do nó *Transform* do componente. Essa arquitetura foi aplicada a movimentos da própria plataforma e de diferentes subconjuntos mecânicos. Durante a programação, foram encontradas dificuldades relacionadas aos referenciais geométricos de determinadas peças. Alguns pontos e coordenadas presentes no modelo dificultavam a definição das rotações e deslocamentos pretendidos. Após a identificação do problema, foram realizadas alterações pontuais no modelo em SolidWorks por outro integrante da equipe, adequando referenciais necessários à programação. Essas modificações facilitaram a implementação dos movimentos conforme o funcionamento esperado.

A verificação das animações foi realizada por inspeção visual no ambiente VRML e pela conferência dos cálculos empregados nas transformações. O comportamento observado foi comparado ao funcionamento esperado dos mecanismos, conforme orientações e discussões realizadas durante o desenvolvimento do projeto.

Resultados e Discussões

O principal resultado obtido foi o desenvolvimento de uma representação tridimensional interativa da versão atual da plataforma assistiva, transformando o modelo proveniente do ambiente CAD, inicialmente estático, em uma estrutura capaz de reproduzir movimentos por meio de comandos programados em VRML. Para viabilizar as animações, os componentes de interesse foram identificados e seus nós *Transform*

organizados de acordo com os movimentos pretendidos. A diferenciação dos subconjuntos por cores também auxiliou na identificação das peças durante a programação. A Figura 2 apresenta o modelo utilizado como base e sua configuração com diferenciação visual dos componentes.

A integração do modelo à interface de comandos possibilitou acionar e observar individualmente as animações no ambiente virtual, conforme apresentado na Figura 3. Essa integração permitiu verificar o comportamento dos diferentes componentes durante a execução dos movimentos programados.

Entre os resultados funcionais obtidos estão a translação da plataforma ao longo de uma trajetória definida durante a programação, sua rotação em torno do próprio eixo, o movimento das rodas motoras, a alteração da orientação dos rodízios giratórios, a abertura dos trilhos destinados ao suporte da cadeira de rodas e o acionamento do mecanismo de elevação. Na translação, foram estabelecidas posições sucessivas para definir o percurso virtual do conjunto. A rotação da plataforma e das rodas foi implementada a partir de variações angulares, enquanto os rodízios giratórios receberam alterações de orientação compatíveis com o movimento representado. A abertura dos trilhos foi realizada pela transformação dos componentes móveis correspondentes.

O mecanismo de elevação apresentou maior complexidade por exigir a atuação coordenada de diferentes peças. Sua animação combinou alterações de posição e orientação em diferentes componentes, sincronizadas ao longo do movimento. Esse resultado demonstrou a necessidade de considerar tanto a hierarquia dos elementos quanto seus referenciais geométricos para reproduzir adequadamente mecanismos compostos. A Figura 4 apresenta a comparação entre as configurações inicial e final de um dos movimentos implementados. Durante o desenvolvimento, verificou-se que alguns referenciais geométricos do modelo dificultavam a aplicação das rotações e translações necessárias. A identificação desse problema levou à realização de adequações pontuais no modelo CAD por outro integrante da equipe, tornando esses referenciais mais apropriados à programação. Essa experiência mostrou que a transferência de uma geometria CAD para um ambiente virtual interativo não se limita à exportação do arquivo, pois a organização geométrica dos componentes influencia diretamente a implementação das animações.

Esse resultado é compatível com trabalhos que discutem a integração entre modelos CAD e ambientes virtuais. Liu et al. (2021) abordam o processamento de modelos CAD para aplicações virtuais, enquanto Grandi et al. (2026) mostram que a conversão de conjuntos CAD em cenários interativos pode envolver preparação da geometria e reorganização da estrutura do produto. No presente trabalho, a dificuldade encontrada com os referenciais reforça essa relação e demonstra uma aplicação prática dessa problemática durante o desenvolvimento da plataforma. Considerando a aplicação assistiva do projeto, a representação virtual permite acompanhar o desenvolvimento dos mecanismos da plataforma e visualizar previamente seu comportamento. Esse recurso se insere no contexto de tecnologias destinadas ao suporte de pessoas com ELA, cujas necessidades funcionais podem se modificar com a progressão da doença (RIVA et al., 2024; BURKE et al., 2025). Nesta etapa, a verificação foi realizada pela observação das animações, pela conferência dos cálculos utilizados nas transformações e pela comparação dos movimentos obtidos com o comportamento funcional esperado.

Os resultados desta Fase 1 estabelecem uma base computacional para o aperfeiçoamento das animações e para a implementação de novas funcionalidades em etapas posteriores do projeto. Como fruto desse projeto de pesquisa, a tecnologia associada ao equipamento foi objeto de pedido de patente depositado junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

Conclusão

O desenvolvimento desta primeira fase permitiu alcançar o objetivo de construir uma representação virtual interativa da plataforma assistiva e simular movimentos associados ao funcionamento de seus componentes. A programação em VRML possibilitou transformar o modelo tridimensional inicialmente estático em um ambiente no qual diferentes mecanismos podem ser acionados e observados de forma dinâmica.

Além da reprodução dos movimentos, o desenvolvimento revelou a importância da preparação do modelo tridimensional para a implementação das animações. As dificuldades encontradas com os referenciais geométricos de algumas peças demonstraram que a organização da geometria influencia diretamente a aplicação adequada de translações e rotações. Dessa forma, o ambiente virtual mostrou-se útil não apenas para a visualização do funcionamento previsto da plataforma, mas também para identificar aspectos do modelo que precisam ser considerados durante sua evolução.

Os resultados desta etapa estabelecem uma base para a continuidade do projeto, permitindo que novas funções sejam incorporadas e que as animações existentes sejam progressivamente aperfeiçoadas. Em etapas futuras, o ambiente poderá ser ampliado e utilizado em conjunto com outras formas de análise do equipamento, contribuindo para o desenvolvimento da plataforma assistiva destinada às necessidades de pessoas com ELA.

Referências

BURKE, K. M. et al. Assistive Technology in ALS: A Scoping Review of Devices for Limb, Trunk, and Neck Weakness. American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation, v. 104, n. 8, p. e115–e124, 2025.

GRANDI, F. et al. CAD-to-VR framework for interactive assembly simulation in product design review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2026. No prelo.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/IEC 14772-1:1997: Information technology — Computer graphics and image processing — The Virtual Reality Modeling Language — Part 1: Functional specification and UTF-8 encoding. Geneva: ISO, 1997.

LIU, R. et al. A survey of immersive technologies and applications for industrial product development. Computers & Graphics, v. 100, p. 137–151, 2021.

RIVA, N. et al. Update on recent advances in amyotrophic lateral sclerosis. Journal of Neurology, v. 271, n. 7, p. 4693–4723, 2024.

Anexos



Figura 1 – Representação da plataforma assistiva acoplada à cadeira de rodas, evidenciando acessórios e dispositivo de comando previstos no projeto. Fonte: Equipe do projeto.



Figura 2 – Modelo tridimensional da versão atual da plataforma assistiva. Fonte: Equipe do projeto; preparação visual realizada pelo autor.



Figura 3 – Ambiente virtual interativo em VRML contendo a representação tridimensional da plataforma e a interface de comandos para acionamento das animações. Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 4 – Comparação entre as configurações inicial e final de movimento programado de elevação no ambiente virtual. Fonte: Elaborado pelo autor.

CÓDIGO: ET1012

AUTOR: MATTEO PEIXOTO

COAUTOR: CARLOS ANTONIO DE LIMA FILHO

COAUTOR: VICTOR HUGH MELO MARTINS SILVA

ORIENTADOR: VICENTE ANGELO DE SOUSA JUNIOR

TÍTULO: Concepção de xApp para a Plataforma near-RT RIC da O-RAN visando a Alocação Dinâmica de Recursos em fatias de rede 5G

Resumo

Embora o fatiamento de rede e a Open RAN aumentem a flexibilidade dos serviços em redes 5G, o fatiamento da RAN permanece desafiador devido aos recursos de rádio compartilhados limitados nas estações base, especialmente sob condições de tráfego variável no tempo. Resolver este problema exige uma camada avançada de agendamento capaz de realizar a alocação de largura de banda em tempo real entre as fatias da RAN ativas. Embora soluções baseadas em aprendizado de máquina tenham sido amplamente exploradas, elas frequentemente envolvem alta complexidade computacional e consumo de energia, limitando a escalabilidade em implantações 5G dinâmicas. Este trabalho introduz o algoritmo GBSS (Guaranteed Bandwidth Slice Scheduling), um mecanismo inovador e de baixa complexidade para agendamento inter-fatias que aloca dinamicamente a capacidade máxima de transmissão por instância de fatia enquanto garante uma cota mínima de recursos por fatia. Avaliamos o GBSS contra a abordagem convencional FSS (Fixed Slice Scheduling) utilizando um ambiente de teste OpenAirInterface (OAI) sob condições de carga de tráfego variável no tempo.

Palavras-chave: O-RAN, Fatiamento de Rede, xApp, Agendamento de Fatias, 5G.

TITLE: Design of an xApp for the O-RAN Near-RT RIC Platform Targeting Dynamic Resource Allocation in 5G Network Slices

Abstract

Although network slicing and Open RAN enhance service flexibility in 5G networks, RAN slicing remains challenging due to the limited shared radio resources at base stations, especially under time-varying traffic conditions. Addressing this problem requires an advanced scheduling layer capable of performing real-time bandwidth allocation among active RAN slices. Although machine learning-based solutions have

been widely explored, they often involve high computational complexity and energy consumption, limiting scalability in dynamic 5G deployments. This work introduces the Guaranteed Bandwidth Slice Scheduling (GBSS) algorithm, an innovative and low-complexity inter-slice scheduling mechanism that dynamically allocates the maximum transmission capacity per slice instance while guaranteeing a minimum resource quota per slice. We evaluate GBSS against the conventional Fixed Slice Scheduling (FSS) approach using an OpenAirInterface (OAI) testbed under time-varying traffic load conditions.

Keywords: O-RAN, Network Slicing, xApp, Slicing Scheduling, 5G.

Introdução

A fatia de rede (NS) constitui um habilitador fundamental para a implantação de serviços diversos dentro de redes móveis de quinta geração (5G) [1]. A NS facilita a criação de múltiplas redes lógicas sobre uma infraestrutura física compartilhada, abrangendo tanto o domínio da Rede de Acesso Radio (RAN) quanto do núcleo de rede (5GC). Esta flexibilidade arquitetural permite uma entrega de serviço sob medida aos usuários finais, aprimorando assim a adaptabilidade das redes de telecomunicações modernas. Paralelamente, emergiu o paradigma Open RAN para democratizar a RAN e habilitar um gerenciamento e personalização flexíveis, promovendo a interoperabilidade de equipamentos multi-vendor através de interfaces abertas, ao mesmo tempo em que permite o controle sofisticado da infraestrutura rádio via Controlador Inteligente de Rede de Acesso (RIC) [2].
No entanto, a realização efetiva da flexibilidade arquitetural da NS no domínio da RAN exige uma camada de agendamento avançada capaz de alocação dinâmica de recursos de rádio entre instâncias de fatia ativas, alinhadas com seus respectivos Objetivos de Nível de Serviço (SLOs). Contudo, agendadores RAN tradicionais são inerentemente inadequados para tal ambiente de fatia dinâmica [5]. Nesse sentido, o problema central abordado neste trabalho é a necessidade crítica de um mecanismo de agendamento inter-fatia de baixa complexidade, porém altamente eficiente, que possa operar efetivamente em tempo real sobre ambientes Open RAN dinâmicos. Embora diversos algoritmos inteligentes, particularmente aqueles baseados em Aprendizado de Máquina (ML) e Aprendizagem por Reforço Profundo (DRL), tenham sido propostos, eles são frequentemente marcados por alta complexidade computacional, consumo energético significativo e tempos de convergência lentos, tornando-os impraticáveis para implementação no mundo real. Isso cria uma lacuna de pesquisa para uma solução leve, adaptativa e prática que possa garantir desempenho sem o sobrecarregamento de modelos preditivos complexos.

Para atender a este desafio, este trabalho introduz o algoritmo de Agendamento de Fatias de Largura de Banda Garantida (GBSS), que é um agendador inter-fatia elástico inovador projetado para alocação dinâmica de largura de banda por fatia. A hipótese central desta obra é que a capacidade ótima de transmissão da fatia pode ser alcançada mediante um mecanismo de agendamento adaptativo baseado em heurística leve. A abordagem do GBSS não apenas minimiza o consumo excessivo de energia, mas também mantém rigorosamente a qualidade do serviço. Além da alocação dinâmica inter-fatia de baixa sobrecarga computacional de largura de banda no domínio do Open RAN através do GBSS, este trabalho traz as seguintes contribuições complementares:

(i) um mecanismo de alocação de recursos adaptativa que ajusta a capacidade máxima de transmissão de cada instância de fatia em resposta à razão de perda de pacotes do usuário, permitindo uma gestão de recursos elástica e eficiente; (ii) uma implementação prática e validação do agendador proposto em um testbed OpenAirInterface (OAI) real, demonstrando sua viabilidade e efetividade sob condições tráficas variadas; e (iii) uma avaliação de desempenho abrangente comparando o GBSS com a abordagem FSS tradicional, mostrando melhorias significativas na manutenção das taxas oferecidas e redução da perda de pacotes em cenários dinâmicos.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: a Seção II revisa o estado da arte e delineia as lacunas da literatura que este trabalho contribui. A Seção III descreve o ambiente de prototipagem do estudo. A Seção IV apresenta os cenários de avaliação e a estrutura dos algoritmos implementados; a Seção V exibe e discute os resultados obtidos; e finalmente, a Seção VI apresenta as principais conclusões do estudo.

Metodologia

Related Works

Estudos recentes investigam diversos algoritmos de otimização e inteligência computacional para alocação de recursos em fatiamento de RAN 5G. Trabalhos consolidados [6]–[11] fundamentam-se em modelagem matemática, pesquisa operacional, meta-heurísticas e Aprendizado de Máquina (ML) para solucionar problemas de alocação e virtual network embedding. Contudo, a maioria valida suas abordagens com dados sintéticos [3], [12], [13] ou simulados [6]–[8], empregando simulações em MATLAB [3], [12] ou simuladores de RAN baseados na interface E2 [13], sendo rara a experimentação em bancadas reais (testbeds) [14]. A validação experimental prática torna-se indispensável para viabilizar implementações na arquitetura Open RAN (O-RAN).

Tanto o Aprendizado por Reforço Profundo (DRL) [11]–[13], [15] quanto o Aprendizado por Reforço (RL) [4], [6] apresentam avanços na eficiência de recursos e entrega de serviços. Todavia, a alta complexidade computacional e temporal desses métodos motiva a investigação de estratégias leves [3], [14]. O processamento centralizado na maioria dessas técnicas restringe sua operação em tempo real em arquiteturas distribuídas. Ademais, comportamentos exploratórios de agentes RL durante o treinamento podem acarretar sobreprovisionamento ou violações de Acordos de Nível de Serviço (SLA), enquanto a convergência lenta e inconsistente dificulta a aplicação prática [4]. Modelos DRL também impõem elevada pegada de carbono e sobrecarga de processamento (CPU overload), limitando sua viabilidade em cenários dinâmicos e sensíveis à latência [16].

No domínio de escalonadores inter-slice [11], [13], [15], [17], o conceito de Substrato de Virtualização de Rede (NVS) [17] introduziu o isolamento e a alocação dinâmica de recursos de rádio em dois níveis: escalonamento inter-slice (alocação de capacidade entre fatias) e intra-slice (distribuição entre fluxos/usuários de cada fatia). Embora pioneiro, o NVS focou em sistemas WiMAX, sem contemplar o ecossistema 5G O-RAN. Estudos recentes aplicam DRL e Aprendizado por Transferência (TL) no nível inter-slice, mantendo algoritmos clássicos no nível intra-slice [11], [13], [15]. Em [15],

propõe-se um escalonamento hierárquico integrando DRL e Proportional Fairness (PF) em O-RAN com FlexRIC e srsRAN, porém mantendo alta complexidade computacional e validação restrita a 4G. O trabalho [14], por sua vez, avalia consumo de memória e latência no framework FlexSlice em 5G, sem propor um escalonador de baixa complexidade.

Para superar a dependência de simulações e o alto custo computacional, as contribuições deste artigo são:
- Proposição do algoritmo heurístico GBSS (Guaranteed Bandwidth Slice Scheduling), que aloca dinamicamente a largura de banda por fatia com baixa sobrecarga computacional em O-RAN;
- Mecanismo adaptativo que ajusta a capacidade de transmissão de cada fatia em tempo real em resposta à taxa de perda de pacotes dos usuários;
- Implementação e validação prática do escalonador em um testbed real com OpenAirInterface (OAI) sob tráfego variável no tempo;
- Avaliação comparativa entre o GBSS e o escalonamento estático FSS (Fixed Slice Scheduling), evidenciando a manutenção das taxas ofertadas e mitigação da perda de pacotes.

System Modeling

A infraestrutura implementada compreende um sistema 5G O-RAN ponta a ponta, englobando o núcleo de rede (5GC), a estação rádio-base (gNB) e um Near-RT RIC (RAN Intelligent Controller). Utiliza-se a plataforma de código aberto OAI, em conformidade com as especificações 3GPP e O-RAN, compatível com plataformas SDR e com o módulo RFSIMULATOR, que emula enlaces de rádio via modelo de canal simplificado [19], [20]. O Near-RT RIC baseia-se no projeto FlexRIC [21]. Os módulos 5GC [22], RAN [23] e RIC [21] utilizam a branch slicing-spring-of-code do OAI. O ambiente foi hospedado em um computador ThinkPad Neo 50s Gen 3 (Intel Core i7-12700, 20 núcleos, 2,10 GHz, 64 GB RAM, Ubuntu 20.04 LTS).
A arquitetura consiste no 5GC configurado com duas fatias isoladas, cada uma dotada de suas próprias funções SMF (Session Management Function) e UPF (User Plane Function), compartilhando as demais funções de controle. As fatias são identificadas via S-NSSAI:
- Fatia 1: SST = 1, SD = 1;
- Fatia 2: SST = 1, SD = 5.

Network Slice Scheduling Algorithms and Evaluation Scenario

Os algoritmos FSS e GBSS operam como xApps no Near-RT RIC sob uma estratégia de dois níveis: o Proportional Fairness (PF) [24] gerencia o escalonamento intra-fatia no gNB, enquanto o xApp aloca frações de PRBs inter-fatia via interface E2 através da função gen_rrm_policy_ratio_group do FlexRIC.

O GBSS regula os PRBs dinamicamente a partir da Taxa de Queda de Pacotes em Downlink [25], monitorada a cada 1 ms. A cada janela de 100 ms, se houver perda, o algoritmo adiciona 5% de PRBs do pool compartilhado à fatia afetada ou realiza a preempção de recursos da fatia estável caso a reserva compartilhada esteja esgotada.

Para validação, o GBSS foi comparado a três configurações estáticas de FSS (20/80, 50/50 e 80/20). O experimento durou 180 segundos sob perfis dinâmicos de tráfego (conforme detalhado na tabela em anexo), utilizando enlace ideal no RFSIMULATOR

para isolar as perdas por escassez de banda. O tráfego UDP descendente foi injetado via Iperf (v3.7, pacotes de 8 kbits) entre o contêiner ext-dn e os UEs para coleta de throughput efetivo e taxa de descarte.

Resultados e Discussões

Esta seção apresenta e discute os resultados dos experimentos indicados na Seção IV. O objetivo é destacar o desempenho do GBSS em comparação com os três algoritmos FSS estáticos em um cenário dinâmico dividido em três intervalos bem definidos. Para fins de apresentar a avaliação de desempenho por meio de curvas de throughput e perda de pacotes ao longo do tempo, apresentamos essa análise detalhada abaixo.

A. Configuração do Método FSS 1 (20/80)

As Figuras 4a e 4b mostram, respectivamente, os resultados de perda de pacotes e throughput efetivo para a Configuração 1 do FSS. Entre 0 e 60 segundos, as fatias da rede foram capazes de servir totalmente ambos os UEs: UE1 e UE2 obtiveram throughputs efetivos médios de aproximadamente 20 e 70 Mbps, respectivamente, sem perda de pacotes detectada.

Entre 60 e 120 segundos, o UE1 experimentou uma perda de pacote média de aproximadamente 42\% e um throughput efetivo médio de 26 Mbps, que é inferior à taxa oferecida. Em contraste, o UE2 manteve um throughput médio de 45 Mbps sem perdas de pacotes. Claramente, a alocação de 20\% da largura de banda para a Fatia 1 foi insuficiente para satisfazer a necessidade de taxa declarada do UE1. Os resultados de perda de pacote corroboram o cálculo de throughput esperado, pois 45×(1 - 0,42) = 26,1 Mbps.

Como esperado, entre 120 e 180 segundos, o UE1 experimentou uma perda de pacote média ainda maior (aproximadamente 60\%) e alcançou um throughput efetivo médio de cerca de 28 Mbps. Este comportamento reflete a incapacidade da Fatia 1 de alcançar a taxa oferecida do UE1 (70 Mbps) com apenas 20\% dos recursos de transmissão, enquanto o UE2 chegou a 20 Mbps sem perdas de pacote.

A Figura 4 ilustra que o throughput efetivo agregado (soma das taxas dos dois UEs) difere nos três intervalos do experimento e é menor quando ocorrem perdas de pacotes.

B. Configuração do Método FSS 2 (50/50)

As Figuras 5a e 5b mostram os resultados de perda de pacotes e throughput efetivo para a Configuração 2 do FSS, respectivamente. Entre 0 e 60 segundos, o UE1 experimentou 0\% de perda de pacote e alcançou a taxa média oferecida de 20 Mbps, enquanto o UE2 teve uma perda de pacote média de 15\% e um throughput médio de 60 Mbps. Este valor é aproximadamente 70×(1 - 0,15) = 59,5 Mbps. Em nossa configuração, o throughput efetivo máximo do sistema com duas fatias foi de aproximadamente 120 Mbps. Assim, distribuir 50\% dos PRBs para uma fatia única resulta em até 60 Mbps.

Entre 60 e 120 segundos, ambos os UEs performaram sem perdas e alcançaram suas respectivas taxas oferecidas, que médias em torno de 45 Mbps. Durante o último intervalo do experimento, entre 120 e 180 segundos, o UE1 experimentou uma perda média de 15\% e não conseguiu atingir a taxa fornecida, atingindo aproximadamente 60 Mbps, enquanto o UE2 permaneceu sem perdas e alcançou uma taxa de 20 Mbps. A causa para este desempenho é a mesma da primeira intervalo do experimento.

C. Configuração do Método FSS 3 (80/20)

As Figuras 6a e 6b mostram os resultados de perda de pacotes e throughput efetivo para a Configuração 3 do FSS. Entre 0 e 60 segundos, o UE1 não sofreu perdas e alcançou a taxa oferecida de 20 Mbps, mas o UE2 experimentou uma perda média superior a 60\% e um throughput efetivo de aproximadamente 28 Mbps. Estes valores correspondem ao terceiro intervalo da Configuração 1, que tem a mesma distribuição de largura de banda e taxas oferecidas como este intervalo do cenário.

Entre 60 e 120 segundos, o UE1 permaneceu sem perdas e alcançou a taxa esperada de 45 Mbps, enquanto o UE2 experimentou uma perda média de 42\% e não conseguiu atender à taxa dada, atingindo aproximadamente 26 Mbps de throughput efetivo. O caso atual é comparável ao segundo intervalo da Configuração 1, gerando os mesmos resultados e razões.

Finalmente, entre 120 e 180 segundos, ambos os UEs experimentaram perdas mínimas, com o UE1 atingindo 70 Mbps e o UE2 alcançando sua taxa oferecida de 20 Mbps, graças à distribuição do PRB em todas as fatias, que fornece capacidade de transmissão consistente com as taxas oferecidas. Esta configuração confirma o funcionamento adequado do algoritmo FSS implementado no xApp, pois configurações comparáveis de taxa oferecida e distribuição de largura de banda entre fatias da rede resultaram em valores consistentes de throughput efetivo e perda de pacote.

D. Método GBSS

As Figuras 7a e 7b apresentam os resultados de perda de pacotes e throughput para o método GBSS proposto. O agendamento adaptativo inter-fatia do GBSS, ao contrário da abordagem do FSS, inicialmente resultou em perda de pacotes porque o iPerf executa três seções com diferentes taxas oferecidas sequencialmente. Devido a este efeito transitório, houve um aumento temporário na perda de pacotes, que rapidamente retornou a 0\% após a fase inicial do experimento. O GBSS manteve os níveis de perda de pacote baixos, com apenas variações pequenas no início de cada intervalo. Além disso, a abordagem lidou eficientemente com cenários com diferentes taxas oferecidas, mantendo os níveis de throughput conforme especificados pelo iPerf para ambos os UEs.

Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise de desempenho da proposta GBSS e três configurações FSS para agendamento de fatias de rede, implementadas como xApps Near-RT RIC utilizando a plataforma OpenAirInterface. A avaliação considerou um cenário dinâmico com duas fatias de rede e dois UEs, onde as taxas oferecidas variavam ao longo do tempo.

Cada configuração FSS retornou resultados que estavam em consistência com a capacidade máxima configurada da rede 5G, distribuição do PRB entre fatias e taxas dos UEs. Com base nas medições Iperf coletadas ao longo de 180 segundos, GBSS demonstrou desempenho superior em relação ao FSS quanto à taxa de transferência e perda de pacotes, alcançando quase zero perda de pacotes no cenário controlado de carga oferecida. Assim, a elasticidade proporcionada pela GBSS gerencia efetivamente os recursos compartilhados do gNB para acomodar demandas de tráfego variadas sem requerer uma solução complexa, melhorando assim a eficiência energética e contribuindo para a redução da pegada de carbono.

Em trabalhos futuros, visamos comparar a GBSS com xApps de agendamento inter-fatias utilizando métodos de Aprendizado de Máquina (ML), levando em conta seu consumo energético. Também planejaremos avaliar estes xApps em cenários com carga oferecida variando aleatoriamente e múltiplos usuários com requisitos distintos de QoS.

Referências

[1] S. M. A. Kazmi et al., Network Slicing: Cache and Backhaul Resource Allocation, 2019.
[2] O-RAN Alliance, “O-RAN ALLIANCE.” [Online]. Available: https: //www.o-ran.org/
[3] R. Schmidt et al., “Slice scheduling with QoS-guarantee towards 5G,” GLOBECOM, 2019.
[4] M. Zangooei et al., “Reinforcement Learning for Radio Resource Management in RAN Slicing: A Survey,” IEEE Communications Magazine, vol. 61, no. 2, pp. 118–124, 2023.
[5] M. Yan et al., “Smart Multi-RAT Access Based on Multiagent Reinforcement Learning,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 5, pp. 4539–4551, 2018.
[6] A. M. Nagib et al., “Accelerating Reinforcement Learning via Predictive Policy Transfer in 6G RAN Slicing,” IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 20, no. 2, pp. 1170–1183, 2023
[7] K. Qiao et al., “Resource Allocation for Network Slicing in Open RAN: A Hierarchical Learning Approach,” IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking,
vol. PP, p. 1, 2024.
[8] H. Zhang et al., “Slicing Framework for Service Level Agreement Guarantee in Heterogeneous Networks - A Deep Reinforcement Learning Approach,” IEEE Wireless Communications Letters, vol. 11, no. 1, pp. 193–197, 2022.
[9] X. Sun et al., “Towards efficient RAN slicing: A deep hierarchical reinforcement learning approach,” Physical Communication, vol. 66, no. July 2023, p. 102386, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10. 1016/j.phycom.2024.102386

[10] G. Zhao et al., “Network Slice Selection in Softwarization-Based Mobile Networks,” Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, vol. 31, no. 1, p. e3617,
2020.
[11] H. Sherif et al., “Energy-Efficient and Accelerated Resource Allocation in O-RAN Slicing Using Deep Reinforcement Learning and Transfer Learning,” Cybernetics and Information Technologies, vol. 24, no. 3, pp. 132–150, 2024.
[12] H. Zhang et al., “Federated Deep Reinforcement Learning for Resource Allocation in O-RAN Slicing,” GLOBECOM, 2022. [13] S. P. Yeh et al., “Deep Learning for Intelligent
and Automated Network Slicing in 5G Open RAN (ORAN) Deployment,” IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 5, no. October 2023, 2024.
[14] C.-C. Chen et al., “FlexSlice: Flexible and real-time programmable RAN slicing framework,” in IEEE GLOBECOM, Kuala Lumpur, 2023.
[15] J. Dai et al., “O-RAN-Enabled Intelligent Network Slicing to Meet Service-Level Agreement (SLA),” IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 24, no. 2, pp. 890–906, 2025.
[16] Y. Azimi et al., “Applications of Machine Learning in Resource Management for RAN-Slicing in 5G and beyond Networks: A Survey,” IEEE Access, vol. 10, 2022.
[17] R. Kokku et al., “NVS: A substrate for virtualizing wireless resources in cellular networks,” IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 20, no. 5, pp. 1333–1346, 2012.
[18] F. Debbabi et al., “An Overview of Interslice and Intraslice Resource Allocation in B5G Telecommunication Networks,” IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 19, no. 4, 2022.
[19] F. Kaltenberger et al., “OpenAirInterface: Democratizing innovation in the 5G Era,” Computer Networks, vol. 176, no. May, p. 107284, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107284
[20] “RFsimulator.” [Online]. Available: https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/-/blob/develop/radio/rfsimulator/README.md
[21] OAI, “FlexRIC, slicing-spring-of-code.” [Online]. Available: https://gitlab.eurecom.fr/mosaic5g/flexric/-/tree/slicing-spring-of-code
[22] ——, “RAN, slicing-spring-of-code,” 2024. [Online]. Available: https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/-/tree/slicing-spring-of-code
[23] ——, “Core Network, slicing-spring-of-code.” [Online]. Available: https://gitlab.eurecom.fr/oai/cn5g/oai-cn5g-fed/-/tree/slicing-spring-of-code
[24] H. I. Fitriasari et al., “Performance Evaluation of Downlink Multi-user OFDMA Scheduling in 5G New Radio (NR),” in ECTI-CON, 2021.
[25] 3GPP, “5G; Management and orchestration; 5G performance measurements,” TS 28.552 V16.6.0, Aug. 2020.

Anexos



Arquitetura de sistema implementada



Ilustração do funcionamento dos algoritmos de escalonamento de fatias



Ilustração do algoritmo GBSS proposto



Resultados da configuração 1 do FSS (20/80)



Resultados da configuração 1 do FSS (50/50)



Resultados da configuração 1 do FSS (80/20)



Resultados do GBSS



Avaliação de cenários

CÓDIGO: ET1016

AUTOR: PABLO MIGUEL DA SILVA TAVARES

ORIENTADOR: ANA CECILIA VIEIRA DA NOBREGA

TÍTULO: Avaliação do uso de escória granulada de alto forno em pastas de cimento para aplicação em poços CCUS

Resumo

A captura, utilização e armazenamento de carbono (Carbon Capture, Utilization and Storage – CCUS) apresenta-se como uma alternativa para a mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO2), sendo a integridade da cimentação dos poços relevante para a segurança do armazenamento geológico. Nesse contexto, este trabalho avalia uma pasta cimentícia de 15,8 lb/gal, composta por cimento Portland Classe G e 30% de escória granulada de alto-forno, quanto às propriedades reológicas, resistência à compressão e comportamento após exposição ao CO2. Foram realizados ensaios reológicos a 27 °C e 52 °C, resistência à compressão após diferentes períodos de cura a 38 °C e 60 °C e exposição de corpos de prova a CO2, sob 60 °C e 2000 psi, durante 14 e 28 dias. Os resultados reológicos apresentaram variações nos parâmetros de gel inicial, gel final, limite de escoamento e viscosidade plástica com a temperatura. A resistência à compressão apresentou aumento progressivo com o tempo de cura, com maiores valores para os corpos de prova curados a 60 °C. A exposição ao CO2 permitiu identificar a formação de uma região carbonatada nas amostras, avaliada por fenolftaleína. Os resultados contribuem para a avaliação do comportamento de pastas cimentícias contendo escória granulada de alto-forno em condições relacionadas à aplicação em poços CCUS.

Palavras-chave: CCUS. Cimentação de poços. Escória granulada. Carbonatação.

TITLE: Evaluation of the use of granulated blast furnace slag in cement slurries for CCUS well applications

Abstract

Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) presents an alternative for mitigating carbon dioxide (CO2) emissions, with well-cementing integrity playing a crucial role in the safety of geological storage. In this context, this study evaluates a 15.8 lb/gal cement slurry — composed of Class G Portland cement and 30% ground granulated blast-furnace slag — regarding its rheological properties, compressive strength, and behavior after CO2 exposure. Rheological tests were conducted at 27°C and 52°C; compressive strength was measured after various curing periods at 38°C and 60°C; and specimens were exposed to CO2 at 60°C and 2000 psi for 14 and 28 days. Rheological results showed variations in initial gel strength, final gel strength, yield point, and plastic viscosity with temperature. Compressive strength increased progressively with curing time, with higher values observed for specimens cured at 60°C. CO2 exposure revealed the formation of a carbonated region within the samples, as assessed using phenolphthalein. These results contribute to the evaluation of the behavior of cement slurries containing ground granulated blast-furnace slag under conditions relevant to CCUS well applications.

Keywords: CCUS. Well cementing. Granulated slag. Carbonation.

Introdução

A tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono (Carbon Capture, Utilization and Storage – CCUS) apresenta-se como uma alternativa para a mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO2) provenientes de processos industriais. No armazenamento geológico de CO2, a integridade dos poços de injeção constitui um aspecto fundamental para a segurança do processo, uma vez que a bainha cimentícia atua como uma barreira ao fluxo de fluidos entre o poço e as formações geológicas. Nesse contexto, a exposição do material cimentício ao CO2 e a seus contaminantes pode provocar alterações na matriz e comprometer a integridade da cimentação, podendo favorecer a formação de caminhos de migração e a perda do isolamento hidráulico (REINIER et al., 2025; NELSON, 2006; THOMAS, 2004).

Nesse cenário, a utilização de materiais cimentícios suplementares, como a escória granulada de alto-forno, constitui uma alternativa para modificar as propriedades das pastas empregadas na cimentação de poços. A substituição parcial do cimento por escória pode contribuir para a redução das emissões associadas à produção de clínquer (IVASHCHYSHYN et al., 2019; WENGUANG et al., 2020), além de promover alterações na estrutura da matriz cimentícia. A escória apresenta atividade hidráulica e potencial de reação em sistemas cimentícios, podendo favorecer a formação de produtos de hidratação e a redução da rede porosa e permeável da matriz curada (ERDOĞAN et al., 2016; KONIECZNA et al., 2021; SMIRNOVA et al., 2020; WENGUANG et al., 2020).

Estudos anteriores indicam resultados promissores para sistemas cimentícios contendo elevados teores de escória. Wenguang et al. (2020), por exemplo, observaram que cimentos com baixo teor de clínquer e elevada proporção de escória superfina de alto-forno apresentam alterações na estrutura dos poros e desempenho mecânico favorável. Dessa forma, a incorporação da escória apresenta potencial não apenas para modificar

as propriedades da pasta antes de sua aplicação, mas também para influenciar seu comportamento após a exposição às condições características de poços destinados ao armazenamento de CO2.

Frente a esse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de uma pasta cimentícia de 15,8lb/gal, composta por Cimento Portland Classe G e 30% de escória granulada de alto-forno, considerando suas propriedades reológicas, o desenvolvimento de sua resistência à compressão e seu comportamento após exposição ao CO2 sob condições de elevada temperatura e pressão. Busca-se, dessa maneira, contribuir para a avaliação do potencial desse sistema cimentício para aplicação em poços associados à tecnologia CCUS.

Metodologia

Os materiais de partida utilizados na formulação da pasta cimentícia, constituídos por cimento Portland classe G de alta resistência a sulfatos (ARS) e escória de alto-forno, foram caracterizados quanto à composição química e à densidade. A composição química dos materiais foi determinada por Fluorescência de Raios X (FRX), enquanto a densidade real foi obtida por meio de picnometria a gás hélio. Os resultados da caracterização são apresentados na Tabela 1.

Conforme apresentado na Tabela 1, o cimento apresentou densidade de 3,17 g/cm³, enquanto a escória apresentou densidade de 2,93 g/cm³. Em relação à composição química, observa-se que a escória é constituída predominantemente por SiO_2 (32,39%) e CaO (31,16%), além de apresentar teores expressivos de Al_2O_3 (23,71%) e MgO (8,82%). A presença desses óxidos é característica de materiais cimentícios suplementares de natureza vítrea e está associada ao potencial de reação da escória em sistemas cimentícios.

A elevada concentração combinada de CaO, SiO_2 e Al_2O_3 indica a presença de constituintes potencialmente relevantes para as reações de hidratação e para a formação de produtos hidratados ao longo do processo de cura. Dessa forma, a incorporação da escória à matriz cimentícia apresenta potencial para modificar a evolução das propriedades mecânicas e a estabilidade da pasta quando submetida às condições de exposição avaliadas neste estudo.

Para o desenvolvimento experimental, foi adotada uma pasta cimentícia com densidade de 1,89 g/cm³ (15,8 lb/gal). Essa densidade foi selecionada por representar uma condição de formulação compatível com aplicações de cimentação de poços e por permitir a avaliação do sistema cimentício sob condições de exposição a CO_2. A composição da pasta, expressa em termos percentuais e de massa dos constituintes, é apresentada na Tabela 2, incluindo as respectivas proporções dos materiais utilizados na formulação.

O preparo da pasta cimentícia, incluindo as etapas de mistura, condicionamento, determinação das propriedades reológicas e avaliação da resistência à compressão, foi

realizado seguindo os procedimentos estabelecidos pela (ABNT NBR 9831, 2020). Após o preparo e a caracterização inicial, a pasta cimentícia foi submetida a um período de cura inicial de 14 dias, à temperatura de 60 °C e pressão de 14,7 psi, utilizando-se banho termorregulador. Essa etapa teve como objetivo promover a hidratação e o desenvolvimento inicial das propriedades da matriz cimentícia antes da exposição ao meio rico em CO_2.

Após o período de cura inicial, os corpos de prova foram submetidos a condições de exposição em autoclave, sob temperatura de 60 °C e pressão de 2000 psi, utilizando-se água deionizada em ambiente contendo 100% de CO_2. A exposição ao meio corrosivo foi conduzida durante períodos de 14 e 28 dias, correspondentes às respectivas idades de exposição. Ao término de cada período de exposição, os corpos de prova foram avaliados quanto à ocorrência e à profundidade da carbonatação. Para a identificação visual da região carbonatada, a fenolftaleína foi empregada como indicador da redução da alcalinidade da matriz, permitindo estimar qualitativamente a profundidade aparente da região afetada pelo CO_2.

Resultados e Discussões

As medições reológicas dos fluidos e a determinação de seus parâmetros reológicos são fundamentais para a definição das vazões de bombeio e para a mitigação dos riscos de fratura das formações durante o deslocamento da pasta ao longo do poço. A partir dos dados de tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento obtidos nos ensaios realizados em ambas as temperaturas, foi possível avaliar o comportamento reológico da pasta de cimento.

A Figura 1 apresenta as curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para as temperaturas de 27 °C e 52 °C. Observa-se que, para uma mesma taxa de cisalhamento, o aumento da temperatura promoveu uma redução da tensão de cisalhamento e, consequentemente, da viscosidade aparente da pasta. Esse comportamento está associado à redução da resistência ao escoamento do sistema com o aumento da temperatura, favorecendo a mobilidade das partículas e reduzindo as forças de interação presentes na suspensão cimentícia.

Durante os ensaios de reologia, além das medições de tensão de cisalhamento em diferentes taxas de deformação, foram determinados os valores de gel inicial (Gi) e gel final (Gf) da pasta de cimento. A partir do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Bingham, foram obtidos os parâmetros reológicos correspondentes à viscosidade plástica (VP) e ao limite de escoamento (LE), apresentados na Tabela 3.

Os valores de gel inicial (Gi) e gel final (Gf) apresentados na Tabela 3 representam a resistência desenvolvida pela pasta durante o período em que permanece em repouso e indicam o esforço necessário para reiniciar seu escoamento após a condição estática. A diferença entre Gf e Gi pode ser utilizada como indicativo do desenvolvimento estrutural da pasta durante o período de repouso. Nesse caso, os valores obtidos foram de 5 lbf/100 ft² a 27 °C e 7 lbf/100 ft² a 52 °C, esses valores sugerem uma maior evolução estrutural durante o período de repouso na condição de 52 °C.

Em relação ao limite de escoamento, observa-se uma redução de 302 para 217 lbf/100 ft² com o aumento da temperatura de 27 °C para 52 °C, correspondendo a uma redução de aproximadamente 28%. Esse comportamento indica que a elevação da temperatura diminuiu a resistência inicial da pasta ao escoamento, o que está de acordo com a tendência observada nas curvas reológicas. De forma semelhante, a viscosidade plástica apresentou redução de 1,4 para 1,0 cP, correspondendo a aproximadamente 29%. Essa redução pode estar relacionada ao aumento da mobilidade das partículas e à diminuição da resistência viscosa da suspensão com a elevação da temperatura.

A resistência à compressão da pasta de cimento foi avaliada após 8 h, 24 h, 3, 7 e 28 dias de cura, nas temperaturas de 38 °C e 60 °C. Os valores médios obtidos são apresentados na Tabela 4.

Os resultados apresentados na Tabela 4 evidenciam a influência da temperatura de cura sobre o desenvolvimento da resistência à compressão da pasta. Em ambas as condições avaliadas, observa-se um aumento progressivo da resistência com o avanço do tempo de cura. Entretanto, a elevação da temperatura de 38 °C para 60 °C promoveu um ganho significativo de resistência, principalmente nas primeiras idades.

Após 8h de cura, a resistência aumentou de 5,8 MPa, a 38 °C, para 12,5 MPa, a 60 °C, representando um incremento de aproximadamente 115%. Em 24h, os valores foram de 8,2 e 16,2 MPa, respectivamente, correspondendo a um aumento de aproximadamente 98%. Aos 3 dias, a resistência passou de 16,0 para 32,3 MPa, representando um incremento de aproximadamente 102%. Esses resultados indicam que a temperatura mais elevada favoreceu significativamente o desenvolvimento inicial da resistência mecânica da pasta.

Aos 7 dias, a resistência alcançou 24,0 MPa para a condição de 38 °C e 36,5 MPa para 60 °C, resultando em um aumento de aproximadamente 52%. Aos 28 dias, os valores foram de 36,0 e 42,8 MPa, respectivamente, correspondendo a um incremento de aproximadamente 19%. A redução progressiva da diferença relativa entre as duas condições ao longo do período de cura indica que o efeito da temperatura foi mais pronunciado nas primeiras idades, enquanto, em idades mais avançadas, as resistências das duas condições apresentaram maior aproximação.

Esse comportamento pode estar associado à aceleração das reações de hidratação do cimento com o aumento da temperatura de cura. A maior temperatura favorece a cinética das reações químicas e o desenvolvimento mais rápido dos produtos de hidratação responsáveis pela formação da estrutura endurecida da pasta. Como consequência, ocorre uma evolução mais rápida da resistência mecânica nas primeiras idades. Entretanto, à medida que o processo de hidratação avança, a diferença entre as condições de cura tende a diminuir, conforme observado aos 28 dias.

A Figura 2 apresenta o aspecto visual das amostras da pasta de cimento após exposição a 60 °C e 2000 psi em meio contendo água deionizada e 100% de CO_2, durante 14 e 28 dias. Observa-se a formação de uma região de coloração cinza, correspondente à zona mais externa da amostra, associada à região afetada pela exposição ao CO_2 e ao consequente processo de carbonatação. Em contraste, a região de coloração rosa representa a porção interna da pasta que permaneceu preservada, sem evidências visuais significativas de degradação.

A comparação entre as amostras após 14 e 28 dias evidencia o avanço da região afetada com o aumento do tempo de exposição. Aos 14 dias, a zona de coloração cinza apresenta menor extensão, enquanto, após 28 dias, observa-se um avanço dessa região em direção ao interior da amostra, acompanhado pela redução da área preservada em rosa. Esse comportamento evidencia a influência do tempo de exposição sobre a progressão do processo de carbonatação, indicando que a interação prolongada entre o CO_2 e a matriz cimentícia favorece o avanço da região alterada.

Visualmente, portanto, o aumento do período de exposição de 14 para 28 dias resultou em uma maior profundidade aparente da região afetada pelo CO_2. Esse resultado demonstra que, sob as condições experimentais empregadas, o processo de degradação não permaneceu restrito à superfície da amostra, apresentando progressão em direção ao seu interior com o prolongamento da exposição. Ressalta-se, contudo, que a diferenciação visual entre as regiões cinza e rosa constitui uma evidência qualitativa do avanço da frente de carbonatação.

Conclusão

A partir dos resultados obtidos neste estudo, foi possível avaliar o comportamento de uma pasta cimentícia de 15,8 lb/gal, formulada com 70% de cimento Portland classe G de alta resistência a sulfatos e 30% de escória de alto-forno, frente às propriedades reológicas, ao desenvolvimento da resistência à compressão e à exposição a um meio contendo 100% de CO_2. Nesse sentido, a caracterização dos materiais de partida evidenciou que a escória apresenta menor densidade em relação ao cimento e composição química rica em CaO, SiO_2 e Al_2O_3, características que conferem ao material potencial de participação nas reações de hidratação e no desenvolvimento da matriz cimentícia.

Quanto ao comportamento reológico, observou-se que o aumento da temperatura de 27 °C para 52 °C promoveu redução do limite de escoamento e da viscosidade plástica, de 302 para 217 lbf/100 ft² e de 1,4 para 1,0 cP, respectivamente. Esse comportamento indica menor resistência ao escoamento e maior mobilidade da suspensão com o aumento da temperatura.

Os ensaios de resistência à compressão demonstraram evolução contínua da resistência com o aumento do tempo de cura nas duas temperaturas avaliadas. A condição de 60 °C proporcionou maior desenvolvimento da resistência, principalmente nas primeiras idades, alcançando 42,8 MPa aos 28 dias, enquanto a pasta curada a 38 °C atingiu 36,0 MPa.

Em relação à exposição ao CO_2, as amostras submetidas a 60 °C e 2000 psi, em água deionizada e atmosfera contendo 100% de CO_2, apresentaram evidências visuais de alteração da matriz cimentícia. A comparação entre 14 e 28 dias mostrou avanço da região afetada pelo CO_2 em direção ao interior dos corpos de prova, indicando que o aumento do tempo de exposição favoreceu a progressão da frente de carbonatação.

Dessa forma, os resultados demonstram que a pasta contendo escória apresentou desenvolvimento satisfatório de resistência mecânica e comportamento reológico dependente da temperatura, além de apresentar alteração progressiva da matriz quando submetida à exposição prolongada ao CO_2. A utilização da escória mostra-se, portanto, tecnicamente relevante como componente da formulação cimentícia, porém os resultados de carbonatação indicam a necessidade de investigações adicionais a fim de determinar sua influência efetiva sobre a resistência à degradação provocada pelo CO_2.

Referências

AMERICAM PETROLEUM INSTITUTE. API RP10B-2: API Recommended Practice for Testing Well Cements. Washington, 2024;

ANURAG, KUMAR, R. (2023). Optimization of Clinker Factor for Low-Carbon Penta-Blended Cement Mortar via Box–Behnken Design of Response Surface Methodology. In: Hau, K.K., Gupta, A.K., Chaudhary, S., Gupta, T. (eds) Recent Advances in Structural Engineering and Construction Management . Lecture Notes in Civil Engineering, vol 277. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4040-8_47;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9831: Cimento Portland para poços petrolíferos — Requisitos e métodos de ensaio, 2020;

ERDOĞAN ÖZBAY, MUSTAFA ERDEMIR, HALIL İBRAHIM DURMUŞ, Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review, Construction and Building Materials, Volume 105, 2016, Pages 423-434, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815308254);

IVASHCHYSHYN, H., SANYTSKY, M., KROPYVNYTSKA, T., & RUSYN, B. (2019). Study of low-emission multi-component cements with a high content of supplementary cementitious materials. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(6 (100), 39–47. https://doi.org/10.15587/1729- 4061.2019.175472;

KONIECZNA, K.; CHILMON, K.; JACKIEWICZ-REK, W. Investigation of Mechanical Properties, Durability and Microstructure of Low-Clinker High-Performance Concretes Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag, Siliceous Fly Ash and Silica Fume. Appl. Sci. 2021, 11, 830. https://doi.org/10.3390/app11020830;

NELSON, E.B. & GUILLOT, D. WellCementing, Second. ed. Schlumberger. Sugar Land, Texas. 773, 2006;

REINIER VAN NOORT, GAUTE SVENNINGSEN, KAI LI, Experimental study on the impact of H2S and H2SO4 in CO2 on five different sealant compositions under conditions relevant for geological CO2-storage, Geoenergy Science and Engineering,

Volume 253, 2025, 214005, ISSN 2949-8910,
https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.214005.
(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S294989102500363X);

Anexos



Tabela 1 - Composição química e densidade dos materiais utilizados na formulação da pasta e 15,8 lb/gal.



Tabela 2 - composição da pasta, expressa em termos percentuais e de massa dos constituintes



Figura 1 - Curvas reológicas da pasta em 27°C e 52°C



Tabela 3 - Parâmetro reológicos obtidos pelo modelo de Bingham e consistência atmosférica



Tabela 4 – Resistência à compressão após diferentes períodos de cura em 38°C e 60°C.



Figura 2 – Amostra da pasta 15,8 lb/gal após condição de 60°C e 2000 psi em água deionizada e 100% de CO2. A) após 14 dias de exposição e B) após 28 dias de exposição.

CÓDIGO: ET1035

AUTOR: GUILHERME ANDRADE VARELA

COAUTOR: MAXMILIANO VITOR DA SILVA CUNHA

COAUTOR: CRISLAINE BEATRIZ GUEDES DA SILVA

COAUTOR: GIOVANI POZZA AZONI

COAUTOR: GEORGE SANTOS MARINHO

COAUTOR: JOSE CESAR AUGUSTO DE QUEIROZ

ORIENTADOR: MAXWELL SANTANA LIBÓRIO

TÍTULO: Análise numérico-experimental da resistência mecânica de membrana para aplicações em tubo de choque

Resumo

O tubo de choque é um dispositivo experimental amplamente utilizado no estudo do escoamento de ar em regimes transônicos e supersônicos. Esse sistema é composto por duas seções, denominadas Driver (alta pressão) e Driven (baixa pressão), separadas por um par de membranas de alumínio responsáveis pela expansão do ar comprimido e pela geração da onda de choque. Atualmente, o rompimento das membranas de aproximadamente 0,1 mm de espessura ocorre sob pressão de aproximadamente 10 atm, gerando uma onda de choque necessária aos ensaios. No entanto, para investigar os efeitos dessa onda em materiais destinados a aplicações aeroespaciais, torna-se necessário operar em faixas de pressão mais elevadas, entre 10 e 20 bar. Nesse contexto, a análise será realizada pelo Método dos Elementos Finitos (FEM) no software ANSYS, considerando pressões entre 5 e 20 bar aplicadas ao driver. De forma análoga ao ensaio de expansão hidráulica (hydraulic bulge test), o deslocamento central da membrana é adotado para estabelecer a relação pressão–deformação e avaliar a aproximação às condições de ruptura. Os resultados fornecem conclusões importantes para estudos posteriores com diferentes espessuras e riscos radiais, contribuindo para o controle da ruptura e para a operação segura do equipamento.

Palavras-chave: FEM, tubo de choque, resistência dos materiais, onda de choque

TITLE: Numerical-experimental analysis of the mechanical resistance of a membrane for shock tube applications

Abstract

The shock tube is an experimental device widely used to study airflow under transonic and supersonic regimes. This system consists of two sections, referred to as the driver (high pressure) and the driven (low pressure), separated by a pair of aluminum diaphragms that expand the compressed air and generate the shock wave. Currently, diaphragms approximately 0.1 mm thick rupture at about 10 atm, generating the shock wave required for the tests. However, investigating the effects of this wave on materials intended for aerospace applications requires operation at higher pressure levels, ranging from 10 to 20 bar. In this context, the analysis will be performed using the Finite Element Method (FEM) in ANSYS software, considering pressures ranging from 5 to 20 bar applied to the driver. As in the hydraulic bulge test, the central displacement of the diaphragm is used to establish the pressure–deformation relationship and assess the approach to rupture conditions. The results provide important insights for subsequent studies involving different diaphragm thicknesses and radial grooves, contributing to rupture control and safe equipment operation.

Keywords: FEM, shock tube, material resistance, shock wave

Introdução

A partir de 2019, com o estabelecimento da parceria entre a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e o Instituto de Estudos Avançados (IEAv), organização militar vinculada ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) da Força Aérea Brasileira (FAB), o Departamento de Engenharia Mecânica recebeu, tubos de aço destinados à construção do primeiro tubo de choque acadêmico da instituição. A incorporação desse equipamento à infraestrutura universitária amplia as possibilidades de realização de atividades experimentais nas áreas da engenharia mecânica, aeroespacial e materiais. Além disso, de forma específica, favorece o desenvolvimento de pesquisas em aerotermodinâmica, escoamentos compressíveis e regimes supersônicos e hipersônicos (Fiuza; Paula Toro; Marinho, 2021).

O tubo de choque é um dispositivo experimental destinado à geração e à propagação controladas de ondas de choque, permitindo reproduzir, em escala laboratorial, condições transitórias de elevada pressão, temperatura e velocidade. Por esta razão, é amplamente empregado na investigação de escoamentos compressíveis, na caracterização de gases em condições extremas, na calibração de sensores de pressão e na avaliação da resposta de materiais e estruturas submetidos a carregamentos impulsivos (Downes; Knott; Robinson, 2014; Park et al., 2023; Rahman et al., 2024). A configuração convencional do equipamento consiste em uma seção motora (driver), contendo gás a alta pressão, e uma seção movida (driven), mantida inicialmente em pressão inferior, separadas por um diafragma ou membrana de ruptura. Quando a diferença de pressão atinge o limite de resistência da membrana, ocorre sua ruptura súbita, dando origem a uma onda de choque que se propaga pela seção de baixa pressão, enquanto uma onda de expansão se desloca em sentido contrário na seção de alta pressão (Kumar; Nedungadi, 2020). A razão inicial entre as pressões, as propriedades dos gases, a geometria do tubo e o tempo e o padrão da abertura da membrana influenciam diretamente a formação, a intensidade, a velocidade e atenuação da onda de choque, sendo, portanto, parâmetros fundamentais para a repetibilidade e a

confiabilidade dos ensaios (Amer et al., 2021; Janardhanraj; Abhishek; Jagadeesh, 2021).

Entretanto, a operação segura e reprodutível do tubo de choque depende do conhecimento prévio do comportamento mecânico da membrana durante a pressurização do driver, uma vez que sua ruptura determina o início do escoamento e influencia diretamente a formação e as características da onda de choque. A definição inadequada da espessura, dos riscos radiais e/ou da geometria da membrana pode resultar em ruptura prematura, pressão superior à prevista ou abertura irregular, comprometendo a segurança operacional e a confiabilidade dos ensaios (Liu et al., 2024; Subburaj; Figueroa-Labastida; Farooq, 2025). A deformação produzida pela pressão apresenta comportamento semelhante ao observado no ensaio de expansão hidráulica (hydraulic bulge test), no qual a pressão aplicada se relaciona ao deslocamento central, parâmetro importante para a avaliação da resposta mecânica de chapas finas submetidas a um estado biaxial de tensões (Cusanno et al., 2021). Assim, este trabalho tem como objetivo estabelecer, por meio de modelagem numérica com o Método dos Elementos Finitos (FEM), no software ANSYS, a relação entre a pressão no driver, na faixa de 5 a 20 bar, e a deformação central de membranas constituídas pela liga de alumínio 3104-H16, visando estimar as condições de ruptura. Os resultados constituem uma base para o dimensionamento de membranas com diferentes espessuras e configurações de riscos radiais, contribuindo para o controle da pressão e do modo de abertura, para a operação segura do equipamento e para a realização de ensaios sob diferentes pressões e velocidades de propagação da onda de choque.

Metodologia

As propriedades mecânicas da liga de alumínio AA3104-H16 foram definidas com base em dados disponíveis na literatura e inseridas no ANSYS para representar o comportamento elástico do material. Adotou-se um modelo de elasticidade linear isotrópica, com módulo de Young E = 70 GPa e coeficiente de Poisson v = 0,33 (Neto et al., 2022). Modelos geométricos de membranas com diferentes espessuras foram construídos para avaliar a influência dessa espessura sobre a deformação induzida pela pressão aplicada. A geometria da membrana apresentada no Anexo 1.1 corresponde a uma folha de alumínio de 60 x 60 mm e espessura de 0,1 mm. A região periférica da geometria foi fixada para restringir o movimento do modelo e favorecer a convergência numérica. Por outro lado, delimitou-se uma região circular com diâmetro de 50,8 nm, correspondente ao diâmetro interno do tubo de choque, a ser submetida à pressão distribuída. As vistas frontal e posterior são apresentadas no Anexo 1.3. Essa geometria foi usada como modelo-base para as diferentes condições de pressão analisadas.

Os modelos foram discretizados por meio de malhas (mesh) de elementos finitos. Os parâmetros empregados na geração e no refinamento das malhas são apresentados nos Anexos 1.1 e 1.2. O procedimento de discretização buscou reduzir o tamanho dos elementos na região circular efetivamente submetida à pressão, na qual se esperavam os maiores deslocamentos e gradientes de deformação. Também foram adotados critérios de controle da malha para melhorar a distribuição e a qualidade dos elementos, contribuindo para a estabilidade e a convergência da solução numérica. As malhas

resultantes, com a distribuição dos nós e elementos ao longo da geometria da membrana, são apresentadas nos Anexos 1.4 e 1.5.

As simulações foram realizadas no módulo Static Structural do ANSYS, destinado à análise estrutural de corpos deformáveis pelo método dos elementos finitos (FEM). Foram aplicadas pressões de 5 a 20 bar sobre a região circular de 50,8 mm de diâmetro, com o objetivo de avaliar a resposta mecânica da membrana em função do aumento da pressão. Foram definidos o número de passos de carga e os respectivos incrementos, além de serem considerados uma grande deformação e a não linearidade geométrica (Large Deflection). As condições de contorno compreenderam a aplicação de pressão uniformemente distribuída nas regiões delimitadas das faces da membrana e a restrição de sua região periférica, conforme apresentado nos Anexos 1.6 e 1.7. No pós-processamento, foram selecionados os resultados de deslocamento total e de deslocamento direcional ao longo do eixo do plano inicial da membrana, conforme mostrado no Anexo 1.8.

O mesmo procedimento de modelagem, geração da malha, aplicação das condições de contorno e solução numérica foi repetido para as membranas com espessuras de 0,1; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 mm. Com base nos resultados obtidos, foram estabelecidas as relações entre a pressão aplicada e o deslocamento central da membrana para cada espessura analisada. Os valores resultantes são apresentados na tabela do Anexo 1.9.

Resultados e Discussões

Para cada espessura obtivemos a seguinte relação presente na tabela abaixo(anexo 2):

Tabela 1 – Deformação da membrana, segundo a pressão aplicada, por espessura da membrana

ANEXO 2

A simulação demonstrou uma significativa redução da deformação da membrana com o aumento de sua espessura, comportamento facilmente observado ao comparar as espessuras de 0,1 mm e 2,0 mm. Esse resultado evidencia a influência da espessura sobre a rigidez da membrana e, consequentemente, sobre sua capacidade de resistir à deformação quando submetida à pressão.

As propriedades mecânicas utilizadas para o material metálico consideram seu comportamento dentro do regime elástico. Dessa forma, os resultados obtidos para a membrana de 0,1 mm, especialmente nas pressões de 15 e 20 bar, devem ser interpretados com cautela, uma vez que as deformações observadas podem indicar uma extrapolação das condições de validade do modelo computacional e, portanto, não necessariamente representar o comportamento real do material. A partir da espessura de 0,5 mm, observa-se um comportamento mais estável entre os diferentes níveis de pressão, tornando os resultados mais consistentes para a análise comparativa da influência da pressão e da espessura sobre a deformação da membrana.

Conclusão

As simulações foram capazes de alcançar resultados satisfatórios ao alcançarem uma relação Pressão x Deformação que se altera para cada espessura selecionada e demonstra o impacto dessa variável na resistência oferecida pelas membranas. Os valores serão implementados como referência para um futuro ensaio no tubo de choque a fim de comparar os valores obtidos pelo software com o caso real a fim de comparar os dados obtidos em ambos os casos.
Para futuras simulações, maior refinamento nas faces escolhidas para receber os parâmetros de pressão, como redução de defeitos, mudança de método da malha e parâmetros avançados serão implementadas e testadas para reduzir a margem de erro e garantir maior fidelidade entre software e ensaios, necessário para desenvolvimento de pesquisas que utilizem o equipamento.

Referências

AMER, Eynas et al. Evaluation of Shock Tube Retrofitted with Fast-Opening Valve for Dynamic Pressure Calibration. Sensors, v. 21, n. 13, p. 4470, jan. 2021.

DOWNES, Stephen; KNOTT, Andy; ROBINSON, Ian. Towards a shock tube method for the dynamic calibration of pressure sensors. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, v. 372, n. 2023, p. 20130299, 28 ago. 2014.

FIUZA, William Henrique de Lima; PAULA TORO, Paulo Gilberto; MARINHO, George Santos. Análise computacional da estrutura de um tubo de choque acadêmico simplificado. Análise computacional da estrutura de um tubo de choque acadêmico simplificado, 2021.

JANARDHANRAJ, S.; ABHISHEK, K.; JAGADEESH, G. Insights into the shockwave attenuation in miniature shock tubes. Journal of Fluid Mechanics, v. 910, p. A3, mar. 2021.

KUMAR, Rubbel; NEDUNGADI, Ashish. Using Gas-Driven Shock Tubes to Produce Blast Wave Signatures. Frontiers in Neurology, v. 11, 21 fev. 2020.

LIU, Yang (刘阳) et al. General theory of diaphragm rupture in a shock tunnel. Physics of Fluids, v. 36, n. 11, p. 117149, 12 nov. 2024.

NETO, Diogo M. et al. Non-Uniform Effect of the Contact Conditions on the Earing Profile in Cylindrical Cups of Anisotropic Materials. Key Engineering Materials, v. 926, p. 1188–1194, 2022.

PARK, Gang-Kyu et al. Blast Resistance Capacities of Structural Panels Subjected to Shock-Tube Testing with ANFO Explosive. Materials, v. 16, n. 15, p. 5274, jan. 2023.

RAHMAN, Mohammad Sazedur et al. Development of a novel method to characterize shock waves interaction with solid objects. Scientific Reports, v. 14, n. 1, p. 28956, 22 nov. 2024.

SUBBURAJ, Janardhanraj; FIGUEROA-LABASTIDA, Miguel; FAROOQ, Aamir. Predicting non-ideal effects from the diaphragm opening process in shock tubes. Physics of Fluids, v. 37, n. 1, p. 016129, 14 jan. 2025.

Anexos



Anexo 1.1 - Vista Frontal da Geometria



Anexo 1.3 - Vista Isométrica na membrana de 2mm



Anexo 1.4 - Detalhes gerais da malha



Anexo 1.5 - Opções de refinamento da malha e Workflow do ansys



Anexo 1.6 - Seleção de suporte em uma das faces



Anexo 1.7 - pressão aplicada em uma das faces



Anexo 1.7 - pressão aplicada em outra face



Anexo 1.8 - Deformação total em exemplo membrana 2mm



Anexo 1.8- Deformação direcional exemplo 2mm



Anexo 2 - Tabela relacionando Pressão, Deformação e Espessura da membrana

CÓDIGO: ET1040

AUTOR: ANNA LUISA CABRAL DE ARAUJO

ORIENTADOR: SANDRA RUFINO SANTOS

TÍTULO: Pesquisa-ação na gestão de estoques: relato de um projeto de iniciação científica em um laboratório de análises clínicas

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma pesquisa-ação aplicada à gestão de estoques em um laboratório de análises clínicas. O projeto teve início com foco na previsão de demanda de insumos, porém as primeiras observações realizadas evidenciaram desafios mais urgentes relacionados à gestão dos estoques, motivando o redirecionamento da pesquisa. O estudo foi conduzido na unidade matriz da organização, adotando abordagem quali-quantitativa e utilizando técnicas como observação direta, conversas informais, interações semiestruturadas e análise de dados. A partir do diagnóstico realizado, foram identificadas oportunidades de melhoria relacionadas à descentralização dos estoques e à ausência de mecanismos formais para controle das movimentações dos materiais. Como resultado, foram propostas e implementadas intervenções voltadas à centralização dos insumos, realização de inventário e implantação de um sistema de controle de entradas e saídas. As ações desenvolvidas possibilitaram maior visibilidade sobre os materiais disponíveis, criação de um histórico de movimentações e estruturação de uma base de dados para subsidiar análises futuras. Embora ainda existam desafios relacionados à acuracidade dos registros realizados pelos usuários, os resultados obtidos indicam que o projeto contribuiu para criar condições mais favoráveis para uma gestão orientada por dados e para o desenvolvimento de novas iniciativas voltadas ao aperfeiçoamento da gestão de estoques na organização.

Palavras-chave: Pesquisa-ação. Gestão de estoques. Laboratório de análises clínicas.

TITLE: Action Research in Inventory Management: A Report on an Undergraduate Research Project in a Clinical Laboratory

Abstract

This paper presents the development of an action research study applied to inventory management in a clinical laboratory. The project initially focused on forecasting the demand for supplies; however, preliminary observations revealed more pressing challenges related to inventory management, prompting a shift in the research focus. The study was conducted at the organization's headquarters using a mixed-methods approach and techniques such as direct observation, informal conversations, semi-structured interactions, and data analysis. Based on the initial assessment, opportunities for improvement were identified, particularly regarding decentralized inventory storage and the lack of formal mechanisms for tracking material movements. As a result, interventions were proposed and implemented to centralize supplies, conduct a physical inventory, and establish a system for tracking material inflows and outflows. These actions improved visibility into available materials, enabled the creation of a transaction history, and supported the development of a database for future analyses. Although challenges remain regarding the accuracy of records entered by users, the findings indicate that the project helped establish more favorable conditions for data-driven inventory management and provided a foundation for further initiatives aimed at improving inventory management practices within the organization.

Keywords: Action research. Inventory management. Clinical laboratory.

Introdução

A gestão de estoques desempenha papel crucial nas organizações da área da saúde, uma vez que a disponibilidade adequada de materiais e insumos está diretamente relacionada à continuidade dos serviços prestados e à qualidade do atendimento oferecido aos usuários. Nesse contexto, a logística de materiais tem assumido importância crescente nas instituições de saúde por contribuir para a disponibilização dos recursos fundamentais às operações e minimizar situações de falta de materiais. Conforme destacado por Chiaretto, Albuquerque e Carneiro (2021), ao discutirem as contribuições de Barbieri e Machline (2011), a logística de materiais em organizações de saúde busca proporcionar um atendimento de qualidade sem a ocorrência de faltas que comprometam a assistência prestada aos pacientes. Ainda, a gestão eficiente dos estoques contribui para o equilíbrio entre a disponibilidade dos insumos e a utilização adequada dos recursos organizacionais.

Apesar de sua relevância, a gestão de estoques ainda representa um desafio para muitas organizações, especialmente em ambientes nos quais existe grande diversidade de materiais e elevada frequência de consumo. A ausência de mecanismos estruturados de controle pode dificultar o acompanhamento das movimentações dos itens, comprometendo a visibilidade sobre os níveis de estoque disponíveis e tornando os processos de reposição mais suscetíveis a falhas. Como consequência, podem ocorrer situações de ruptura, desperdícios e dificuldade na tomada de decisões relacionadas ao abastecimento e ao armazenamento dos materiais.

Nesse contexto, foi desenvolvido um projeto de iniciação científica em um laboratório de análises clínicas com o propósito de contribuir para a compreensão e a melhoria dos processos associados à gestão de estoques. Considerando a necessidade de alinhar a produção de conhecimento às demandas reais da organização estudada, a pesquisa foi conduzida por meio da abordagem de pesquisa-ação. Segundo Koerich et al. (2009), a

pesquisa-ação compreende a identificação de um problema em determinado contexto, a coleta e análise de informações relacionadas a esse problema e a implementação de ações voltadas à transformação da realidade observada. Dessa forma, essa abordagem permite integrar teoria e prática por meio da participação ativa dos envolvidos no processo de investigação e mudança.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de uma pesquisa-ação aplicada à gestão de estoques em um laboratório de análises clínicas, destacando sua evolução, as principais intervenções realizadas e os resultados obtidos ao longo de sua execução.

Metodologia

A pesquisa caracteriza-se como uma pesquisa-ação de natureza aplicada, desenvolvida a partir da parceria entre um grupo de iniciação científica de uma universidade e um laboratório de análises clínicas. A escolha por essa abordagem se deu em razão da necessidade de compreender os problemas existentes no ambiente estudado e, paralelamente, propor e implementar melhorias alinhadas às necessidades da organização. Além disso, o trabalho adotou uma abordagem quali-quantitativa, combinando técnicas de observação e interação indireta com os participantes, juntamente com a coleta e análise de dados operacionais relacionados à gestão de estoques.

O estudo foi conduzido na unidade Matriz da organização, escolhida como a unidade piloto para o desenvolvimento das atividades de pesquisa e das intervenções propostas. Inicialmente, foram realizadas visitas técnicas com o intuito de compreender o funcionamento da operação, identificar os principais processos relacionados à utilização e ao abastecimento de materiais e observar como funcionava a gestão de estoques. Nessa etapa, foram envolvidas algumas técnicas de coletas de informações, como a observação direta do ambiente, conversas informais e interações semi estruturadas com colaboradores de diferentes áreas da empresa, com destaque para os profissionais ligados à logística, ao almoxarifado e à gestão da unidade.

A partir das observações realizadas no ambiente de estudo, verificou-se que os principais desafios enfrentados pela empresa tinham relação com a gestão de estoques, especialmente em função da ausência de controles formais das movimentações dos materiais e da distribuição dos insumos em diferentes setores da unidade. Diante desse cenário, o projeto foi redirecionado, saindo de um foco inicial em previsão de demanda para uma abordagem voltada à gestão de estoques. Como uma das primeiras intervenções decorrentes desse diagnóstico, foi realizada a centralização dos materiais, que anteriormente eram distribuídos pelos setores da unidade, seguida da realização de um inventário para identificação e organização dos itens armazenados.

Após a centralização do estoque, foram desenvolvidas atividades de coleta e análise de dados com o objetivo de subsidiar a estruturação de mecanismos de gestão e controle. Entre as informações analisadas, encontram-se dados relacionados a pedidos regulares realizados, pedidos extras e quantidade de exames executados. Em etapas posteriores da

pesquisa, também foram coletadas informações referentes às dimensões dos insumos e aos espaços disponíveis para estocagem, subsidiando análises relacionadas ao estudo do dimensionamento do estoque, cálculos de capacidade de armazenamento e análises voltadas à proposição de melhorias para o ambiente. Para isso, foram utilizadas ferramentas da Engenharia de Produção, incluindo a classificação ABC dos materiais, cálculos de estoque máximo e estudos relacionados ao dimensionamento do estoque. Para além, foi aplicada a metodologia Systematic Layout Planning (SLP), complementada pelo uso de diagramas de relações e diagramas de spaghetti para avaliação dos fluxos internos e elaboração de propostas de melhoria para o layout do espaço físico do estoque.

Por se tratar de uma pesquisa-ação, as etapas do projeto não ocorreram de forma estritamente sequencial, mas de maneira iterativa, com realimentação constante entre diagnóstico, análise e intervenção. Dessa forma, os resultados obtidos em cada fase do projeto guiaram a definição das etapas seguintes, permitindo a construção gradual de soluções que estivessem alinhadas às necessidades identificadas no ambiente estudado e contribuindo para a consolidação de uma base de informações voltada à melhoria da gestão de estoques da organização.

Resultados e Discussões

3.1 Evolução e redirecionamento da pesquisa

O projeto teve seu início focado na previsão de demandas de insumos utilizados em um laboratório de análises clínicas localizado em Natal, no Rio Grande do Norte. A proposta original buscava compreender o comportamento da demanda e identificar formas de apoiar o planejamento dos estoques, reduzindo situações de excesso ou falta de materiais. Para isso, foram desenvolvidas atividades de levantamento bibliográfico e uma revisão sistemática da literatura voltada aos métodos de previsão de demanda aplicados ao contexto da saúde. Entretanto, à medida que houve um avanço para as etapas de observação do ambiente organizacional, ficou evidente que existiam desafios mais imediatos relacionados à gestão dos estoques, os quais limitavam a efetividade de qualquer iniciativa voltada exclusivamente à previsão de demanda.

Durante as primeiras visitas foi possível ter uma aproximação com a rotina da empresa, proporcionando uma visão mais ampla das práticas utilizadas para armazenamento, reposição e controle dos materiais. Nesse momento, foi possível constatar que a principal dificuldade não encontrava-se necessariamente na previsão do consumo futuro, mas na ausência de mecanismos que possibilitasse o acompanhamento adequado dos níveis de estoques existentes. Essa percepção motivou discussões entre a equipe de pesquisa e os representantes da empresa, levando ao entendimento de que seria mais relevante atuar inicialmente sobre os problemas estruturais da gestão dos materiais.

O redirecionamento da pesquisa ocorreu de forma gradual e alinhada entre as partes envolvidas. Em vez de seguir um planejamento rígido previamente estabelecido, o projeto passou a incorporar as necessidades identificadas ao longo do contato com a realidade organizacional. Esse processo evidenciou uma característica marcante da

pesquisa-ação: a construção conjunta do conhecimento a partir da interação contínua entre pesquisadores e participantes, permitindo que os objetivos e as ações fossem moldados de acordo com novos diagnósticos e oportunidades de melhoria surgiam durante o desenvolvimento do estudo.

Além das observações realizadas em campo, a evolução da pesquisa foi sustentada por reuniões quinzenais da equipe de iniciação científica, nas quais eram discutidos os resultados parciais, as análises desenvolvidas e os direcionamentos futuros do projeto. Sempre que uma proposta de intervenção ou um resultado relevante era consolidado, eram promovidos momentos de alinhamento com a organização parceira para apresentação das conclusões e definição conjunta dos próximos passos. Assim, o processo de investigação passou a ocorrer de maneira iterativa, caracterizado por sucessivos ciclos de observação, análise, discussão e intervenção.

3.2 Construção do diagnóstico da gestão de estoques

O diagnóstico da situação inicial foi construído a partir da combinação de observações diretas, conversas informais, interações semiestruturadas com colaboradores e análises de dados operacionais disponibilizados pela organização. Diferentemente de uma única avaliação, a compreensão do problema foi sendo desenvolvida progressivamente à medida que novas informações eram coletadas e confrontadas com as observações realizadas durante as visitas técnicas.

Um dos principais aspectos observado foi a descentralização dos estoques. Os insumos permaneciam armazenados nos próprios setores de utilização, fazendo com que diferentes categorias de insumos fossem distribuídas ao longo da unidade. Materiais de laboratório permaneciam próximos às áreas de coleta, materiais de expediente eram guardados em armários na recepção, enquanto outros suprimentos permaneciam armazenados nos próprios locais de uso. Apesar de essa configuração facilitar o acesso imediato aos itens, ela dificultava o acompanhamento global dos estoques e limitava a visibilidade sobre as quantidades efetivamente disponíveis.

Outro ponto observado foi a inexistência de um sistema estruturado de controle das movimentações. Não havia nenhuma forma de registro sistemático das entradas e saídas dos materiais, fazendo com que o monitoramento dos estoques dependesse essencialmente da percepção dos colaboradores. Como consequência, a identificação da necessidade de reposição geralmente ocorria por meio da observação visual dos itens armazenados, sendo frequentemente necessária a contagem dos itens para fazer os pedidos de reposição, reduzindo a confiabilidade das informações disponíveis para a tomada de decisões.

As análises desenvolvidas ao longo do projeto também contribuíram para ampliar a compreensão da problemática. Foram avaliados dados relacionados aos pedidos regulares realizados pela unidade, pedidos extras e quantidade de exames executados, buscando identificar padrões de consumo e comportamentos relevantes para a gestão dos materiais. Em paralelo a isso, novas observações realizadas em campo permitiam validar hipóteses e direcionar novas frentes de investigação. Dessa forma, o diagnóstico não foi resultado de uma única fonte de informação, mas da integração contínua entre evidências quantitativas e percepções obtidas diretamente na operação.

Com esse conjunto de análises, foi possível verificar que a falta de controle favorecia tanto situações de ruptura quanto de desperdício. Em alguns casos, a necessidade de reposição era identificada apenas quando os materiais já estavam esgotados ou muito próximos de acabar. Em outros casos, quantidades superiores às efetivamente necessárias eram solicitadas, dificultando o acompanhamento do consumo real e aumentando o risco de utilização ineficiente dos recursos disponíveis. Essas constatações reforçaram a necessidade de desenvolver mecanismos capazes de proporcionar maior visibilidade e rastreabilidade sobre os estoques da organização.

3.3 Desenvolvimento das intervenções

Com base nos resultados obtidos durante a etapa de diagnóstico, uma das primeiras intervenções definidas em conjunto com a organização foi a centralização dos estoques na unidade em estudo. A proposta surgiu como alternativa para reduzir a dispersão dos materiais e facilitar o acompanhamento das quantidades disponíveis. Para viabilizar essa mudança, foi reaproveitado um espaço já existente na unidade, que ficou destinado a concentrar os itens que anteriormente permaneciam distribuídos entre os diferentes setores.

A implementação da centralização foi conduzida pela própria gestão da unidade, demonstrando o alinhamento entre a organização e as ações propostas pela pesquisa. A partir dessa mudança, os setores passaram a manter apenas os insumos necessários para as atividades diárias, enquanto os demais materiais permaneceram armazenados no estoque central. Essa nova configuração permitiu a criação de um ponto único de armazenamento e contribuiu para a construção de uma visão mais consolidada dos recursos disponíveis.

Após essa unificação, foi realizado um inventário de todos os materiais armazenados. Essa atividade teve como principal objetivo identificar as quantidades disponíveis de cada item e estabelecer uma base inicial para as etapas seguintes do projeto. Além de fornecer uma imagem da situação dos estoques naquele momento, o inventário possibilitou a organização das informações necessárias para o desenvolvimento de mecanismos de controle e monitoramento das movimentações futuras.

Em paralelo à organização física dos materiais, foram desenvolvidos estudos voltados ao dimensionamento dos estoques. A partir da análise do histórico de consumo da unidade, foram realizados cálculos de estoque máximo para os materiais avaliados, considerando dados históricos de um ano de operação. Essas análises tiveram como objetivo fornecer parâmetros para apoiar o abastecimento dos itens e reduzir situações de indisponibilidade. Como o espaço destinado à armazenagem apresentava limitações físicas, também foi realizada uma classificação ABC dos materiais, permitindo identificar os itens mais relevantes para a definição das prioridades de ocupação do estoque e para a aplicação dos níveis de estocagem propostos.

Além dos estudos relacionados a esse dimensionamento, a pesquisa contemplou análises voltadas à organização física do estoque centralizado. Para isso, foram levantadas informações referentes às dimensões dos insumos e às características do espaço disponível, possibilitando a realização de estudos de capacidade e ocupação. Com base nesses dados, foi aplicada a metodologia do SLP com o objetivo de avaliar a adequação do layout existente e propor alternativas de melhorias para esse arranjo. Como

ferramentas de apoio, foram utilizados diagramas de relações e diagramas de spaghetti, permitindo analisar a proximidade desejável entre áreas e compreender os fluxos percorridos pelos colaboradores durante as atividades de movimentação e retirada dos materiais.

Simultaneamente à implementação dessas mudanças, continuaram sendo desenvolvidas análises relacionadas aos pedidos da unidade, aos pedidos extras e ao consumo associado à realização dos exames laboratoriais. Os resultados dessas avaliações passaram a embasar estudos voltados ao dimensionamento dos estoques e à definição de parâmetros para apoiar futuras decisões gerenciais. Ao mesmo tempo, novas observações realizadas em campo permitiam aperfeiçoar continuamente o entendimento sobre o funcionamento da operação e sobre as necessidades da organização.

Como desdobramento dessas iniciativas, foi implantado um sistema de controle das movimentações dos insumos. O processo foi estruturado de forma que as retiradas realizadas pelos colaboradores devem ser registradas por meio de formulários eletrônicos, gerando uma consolidação automática dessas informações em uma planilha, na qual também são inseridos os registros de entrada dos materiais. Dessa forma, tornou-se possível acompanhar essas entradas e saídas dos itens e manter uma estimativa contínua das quantidades disponíveis em estoque.

Junto a essa mudança na organização física dos materiais, também houveram alterações na rotina operacional da unidade. Atualmente foi definida uma sistemática para a realização das retiradas dos materiais armazenados no estoque central, na qual é definida uma pessoa responsável por cada setor semanalmente, contribuindo, assim, para a padronização do processo.

3.4 Resultados observados, limitações e perspectivas futuras

Até o momento, os resultados observados estão relacionados, principalmente, à estruturação dos processos de controle dos materiais e à criação de condições mais favoráveis para a gestão do estoque. A centralização permitiu reduzir a dispersão dos insumos entre os setores e, consequentemente, possibilitou uma visualização mais ampla dos materiais disponíveis. Além disso, a implementação do sistema de controle criou um histórico de movimentações que anteriormente não existia, permitindo registrar informações relevantes sobre o consumo dos itens e sobre as reposições realizadas.

Um outro resultado relevante foi a criação de uma base de dados capaz de apoiar futuras análises e tomadas de decisão. Anteriormente, a organização não possuía mecanismos que permitissem acompanhar de forma estruturada o fluxo de saídas e as demandas de cada material. Com a implementação dos registros eletrônicos, tornou-se possível iniciar a construção de informações históricas que poderão subsidiar estudos de consumo, dimensionamento dos estoques e definição de parâmetros mais adequados para reposição dos materiais.

Os estudos desenvolvidos também contribuíram para ampliar o entendimento sobre a utilização do espaço físico destinado ao armazenamento dos materiais. Com a aplicação da metodologia SLP aliada aos diagramas de relações e de spaghetti, foi possível elaborar propostas de melhoria para o layout do estoque centralizado. As análises dos

fluxos de movimentação evidenciaram algumas oportunidades de reorganização dos itens armazenados, uma vez que os percursos realizados durante as retiradas nem sempre seguiam uma sequência lógica compatível com a disposição física dos materiais.

Apesar dos avanços alcançados, o processo de implementação ainda enfrenta alguns desafios. Embora a ferramenta de controle esteja em funcionamento e parte da equipe realize os registros previstos, ainda são identificadas divergências entre as quantidades físicas armazenadas e os valores registrados virtualmente. Essas diferenças indicam que nem todas as movimentações estão sendo registradas de forma consistente, comprometendo a acuracidade das informações disponíveis. Dessa forma, a consolidação dos benefícios esperados depende, para além da existência da ferramenta, da incorporação efetiva dos procedimentos de registro à rotina operacional dos colaboradores.

Os resultados que já puderam ser obtidos indicam que o projeto contribuiu para criar condições necessárias para uma gestão mais orientada por dados, embora esse potencial ainda dependa da evolução dos mecanismos de controle implementados. A existência de registros estruturados, associada à centralização dos materiais, representa um avanço em relação ao cenário inicialmente observado e fornece suporte para o desenvolvimento das próximas fases da pesquisa. Por se tratar de um projeto ainda em andamento, diversas frentes de trabalho permanecem em desenvolvimento. Entre elas, destacam-se a consolidação dos estudos de dimensionamento dos estoques, incluindo análises relacionadas ao estoque de segurança e à aplicação de conceitos do modelo de revisão periódica, bem como a avaliação das propostas de layout desenvolvidas para o estoque centralizado. Além disso, existe a expectativa de que as soluções desenvolvidas na unidade piloto possam servir como referência para aplicação em outras unidades da empresa, ampliando o alcance dos resultados obtidos e contribuindo para a consolidação das práticas de gestão de estoques em um contexto mais abrangente.

Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo apresentar o desenvolvimento de uma pesquisa-ação aplicada à gestão de estoques em um laboratório de análises clínicas, destacando a evolução do projeto, as intervenções realizadas e os resultados obtidos ao longo de sua execução. A partir da entrada da equipe de pesquisa para entender o contexto organizacional, foi possível identificar que os principais desafios enfrentados pela empresa estavam relacionados à ausência de mecanismos estruturados de controle dos materiais, o que motivou o redirecionamento do estudo para questões ligadas à gestão de estoques. Esse processo evidenciou a importância da aproximação entre pesquisa e prática, permitindo que as ações desenvolvidas estivessem alinhadas às necessidades reais da organização.

Entre as intervenções realizadas, destaca-se a centralização dos estoques da unidade estudada, considerada um marco importante para o desenvolvimento do projeto. Essa mudança possibilitou uma maior visibilidade dos materiais disponíveis e criou as condições necessárias para implantação de mecanismos de controle das movimentações. Ainda, a implementação do sistema de registros de entradas e saídas contribuiu para a

construção de uma base de dados, permitindo o acompanhamento das movimentações dos materiais e fornecendo suporte para futuras análises relacionadas ao consumo e ao dimensionamento dos estoques.

Apesar dos avanços alcançados, o projeto ainda se encontra em desenvolvimento e enfrenta alguns desafios relacionados à consolidação das práticas implantadas, especialmente quanto à acuracidade dos registros realizados pelos usuários do sistema de controle. Nesse sentido, os resultados obtidos até o momento não representam uma etapa final, mas a construção de uma base para futuras melhorias. Como continuidade da pesquisa, destacam-se os estudos relacionados ao dimensionamento dos estoques, à reorganização física dos materiais e à proposição de layouts para os ambientes de armazenamento, bem como a possibilidade de replicação das soluções desenvolvidas em outras unidades da organização.

Referências

CHIARETTO, S.; ALBUQUERQUE, L. B.; CARNEIRO, T. R. Um estudo sobre os impactos da gestão de estoques nas instituições hospitalares. Revista Científica Faculdade Unimed, v. 3, n. 3, 2021.

KOERICH, M. S.; BACKES, D. S.; SOUSA, F. G. M.; ERDMANN, A. L.; ALBUQUERQUE, G. L. Pesquisa-ação: ferramenta metodológica para a pesquisa qualitativa. Revista Eletrônica de Enfermagem, v. 11, n. 3, p. 717-723, 2009.

CÓDIGO: ET1044

AUTOR: MAYKON LUIZ ALEXANDRE BARBOSA

ORIENTADOR: ANGELO RONCALLI OLIVEIRA GUERRA

TÍTULO: PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA EM SUPORTES PARA ESMERILHADEIRAS COM A INTEGRAÇÃO DE UMA ANÁLISE ANTROPOMÉTRICA DO OPERADOR E AUTOMATICAMENTE REALIZAR O AJUSTE VERTICAL COM BASE EM NORMAS ERGONÔMICAS

Resumo

A presente invenção refere-se a um suporte de esmerilhadeira com elevação automática da mesa por referência antropométrica ao cotovelo do operador. O equipamento compreende uma estrutura de suporte para esmerilhadeiras manuais, dotada de mesa de apoio com movimento vertical, um conjunto de sensores para determinação da altura do cotovelo do usuário em posição de trabalho e um mecanismo de elevação acionado automaticamente, preferencialmente por atuadores eletromecânicos lineares ou sistema de fuso motorizado. A partir da leitura da posição do cotovelo, uma unidade de controle calcula a altura ergonômica recomendada da superfície de trabalho com base em parâmetros estabelecidos em normas de ergonomia e antropometria, tais como a NR-17 Ergonomia, que busca adaptar o trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, e a ISO 14738, que define requisitos antropométricos para o projeto de postos de trabalho em máquinas, em consonância com os princípios gerais da ISO 6385. Serviços e Informações do Brasil. Em seguida, a mesa é ajustada automaticamente até essa posição, podendo ainda permitir ajustes finos manuais e o armazenamento de perfis individuais de operadores, reduzindo riscos ergonômicos e padronizando a regulagem da bancada de esmerilhamento.

Palavras-chave: esmerilhadeira, ergonomia e antropometria

TITLE: Technological forecasting regarding angle grinder stands, integrating operator anthropometric analysis and automatic vertical adjustment based on ergonomic standards.

Abstract

The present invention relates to a grinder support featuring automatic table elevation based on the operator's elbow height (an anthropometric reference). The equipment comprises a support structure for handheld grinders equipped with a vertically movable support table, a sensor array to determine the user's elbow height while in the working position, and an automatically actuated lifting mechanism—preferably using linear electromechanical actuators or a motorized lead screw system. Based on the detected elbow position, a control unit calculates the recommended ergonomic working surface height using parameters established in ergonomics and anthropometry standards—such as NR-17 (Ergonomics), which aims to adapt work to the psychophysiological characteristics of workers, and ISO 14738, which defines anthropometric requirements for the design of machine workstations in accordance with the general principles of ISO 6385. The table is then automatically adjusted to this position; the system may also allow for manual fine-tuning and the storage of individual operator profiles, thereby reducing ergonomic risks and standardizing the adjustment of the grinding workbench.

Keywords: angle grinder, ergonomics, and anthropometry

Introdução

A esmerilhadeira é um equipamento versátil utilizado para fazer cortes, lixar e fazer retoques e polimentos em superfícies metálicas. Para isso, ela pode ser equipada com discos de corte para executar cortes rápido, discos de desbaste constituído de materiais abrasivos que servem para fazer nivelamento de soldas e preparação de superfícies para soldagem e remoção de rebarbas e discos flap que tem o objetivo de dar acabamento e polimento às superfícies metálicas, assim pode ser adaptável de acordo com o propósito e material a ser trabalhado (BOSCH, 2026).

Para que os trabalhos sejam executados com uso da ferramenta de forma precisa e segura é necessário que os serviços de cortes em materiais sejam feitos com suporte para esmerilhadeira de bancada que é um acessório muito importante projetado para acomodar a ferramenta visando garantir praticidade e versatilidade para os profissionais liberais no seu dia a dia de trabalho. O suporte para esmerilhadeira tem como objetivo aumentar a eficiência do trabalho, proporcionando conforto ao operador e aprimorar a segurança durante a execução dos serviços. (LYNUS, 2026)

A ergonomia é definida como a ciência que busca adaptar o trabalho às características e limitações do ser humano, promovendo segurança, conforto, saúde e melhor desempenho durante a execução das atividades (ABERGO, 2026). A postura correta durante a operação de esmerilhadeiras é essencial para reduzir a fadiga, aumentar a precisão do trabalho e prevenir lesões musculoesqueléticas. Como essa ferramenta exige controle constante e pode gerar forças de reação significativas, a posição do corpo deve proporcionar equilíbrio e estabilidade (EPR CONSULTORIA, 2026; UFSM, 2018).

O operador deve manter os pés afastados na largura dos ombros, distribuindo o peso corporal de forma equilibrada entre as duas pernas. Essa posição oferece uma base estável

e reduz o risco de perda de controle da ferramenta, especialmente em situações de travamento ou recuo do disco. A coluna deve permanecer o mais próxima possível de sua curvatura natural, evitando inclinações excessivas para frente ou torções do tronco. Quando a peça estiver em uma posição inadequada, é preferível posicioná-la ou ajustar a bancada em vez de adotar posturas forçadas durante longos períodos. Os braços devem permanecer próximos ao corpo sempre que possível. Manter os braços elevados acima da altura dos ombros por períodos prolongados provoca fadiga muscular e aumenta o risco de lesões nos ombros e pescoço. Os punhos devem permanecer alinhados com os antebraços, evitando flexões ou desvios excessivos. Punhos dobrados aumentam a tensão sobre tendões e nervos, podendo favorecer o desenvolvimento de lesões por esforços repetitivos e distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho (UFSM, 2018; ABNT, 2013).

Outro ponto importante é evitar permanecer muito tempo na mesma posição. A alternância de postura e a realização de pausas periódicas ajudam a reduzir a fadiga muscular e melhoram a circulação sanguínea. Em operações contínuas, pequenas pausas para alongamento dos braços, ombros, pescoço e região lombar podem contribuir significativamente para o conforto do trabalhador (ABERGO, 2026; BRASIL, 2022).

O presente estudo propõe uma análise minuciosa de patentes nas plataformas Wipo Patentscope no intuito de estudos nacionais e na Espacenet Patents com propósito internacional. Por meio da prospecção tecnológica entender como a evolução nacional e internacional de patentes relacionadas a esmerilhadeiras e suporte de esmerilhadeiras se comportam, com isso, identificar lacunas para inovação.

Metodologia

2.1. ETAPA PREPARATÓRIA

É a etapa que tem como objetivo estruturar o processo de coleta de dados tecnológicos, garantindo maior confiabilidade e direcionamento aos resultados obtidos. Para isso, algumas vertentes a fim de alcançar a maior qualidades dos dados que são:

Definição do problema: Falta de adaptação ergonômica dos suportes de bancada ocasionando riscos ao operador.

Seleção das bases de patentes: Foram selecionadas bases de patentes, como o INPI, WIPO e Espacenet, para realização das buscas tecnológicas.

Elaboração da metodologia: As fases foram construídas pelo código ipc para área de interesse, palavras-chaves, chave de busca apropriada e resultados qualitativos das buscas.

2.2. FASE PRÉ-PROSPECTIVA

É a fase do estreitamento das ideias, na qual avalia-se a viabilidade do trabalho. Através disso foram analisados a sequência dos seguintes processos:

Determinação de patentes relacionadas a área de interesse na base de patentes INPI;

Definição do código IPC;

Escolhas das palavras-chaves;

Seleção das bases de patentes;

Encontrar a chave de busca adequada para análise dos dados;

Resultados qualitativos encontrados;

2.3. Determinação de patentes relacionadas a área de interesse na base de patentes INPI

Para abranger patentes internacionais, primeiro foi feito uma busca no banco de dados nacional brasileira na base de patentes INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) na qual foi implementado a palavra “esmerilhadeira” no título e no resumo, com isso tivemos 20 resultados que deu a informação do código ipc descrito para cada patente, portanto, a família ipc mais relevante foi a B24B.

2.4. Definição dos códigos IPC e CPC

Com intuito de ter resultados mais assertivos, as buscas começou pelos códigos IPC (International Patent Classification) é a classificação de patentes internacional que foi criado pela WIPO (World Intellectual Property Organization) com finalidade de linguagem padrão das patentes, através disso, o IPC é uma estrutura de comunicação para buscas amplas.

2.5. Escolhas das palavras-chaves

Com a determinação da família de buscas pelos códigos IPC, foram inseridas palavras chaves, na qual vai agregar a busca e ter resultados mais confiantes. Para tal objetivo, as palavras escolhidas foram baseadas no propósito do presente trabalho.

A forma que foi implementado as palavras com o direcionamento onde o objetivo da busca é abranger as patentes que tem relação ao projeto, a escolha foi de palavras simples, como: “esmerilhadeira”, “adaptação”, “base”, “suporte”, “segurança” e “sensor”. Somado a isso, foram feitas traduções dessas palavras e adicionado algumas palavras que têm uma ligação forte.

2.6. Seleção das bases de patentes

Como a meta é correlacionar os códigos IPC, foram escolhidas duas bases de patentes que são a WIPO e Spacenet Patents por ser gratuito, confiável, abranger internacionalmente e ter o mecanismo de filtro dos resultados.

2.7. Encontrar a chave de busca adequada para análise dos dados

Depois do código IPC definido e também as palavras-chaves, foram feitas buscas mais gerais e outras específicas, a seguir as tabelas irão relacionar o id de busca com a chave de busca.

Na plataforma WIPO não teve buscas como por exemplo de títulos, resumo ou reivindicações, pois obteve uma boa faixa de resultados para análise, por isso a busca foi de forma mais geral, buscando essas palavras chaves na patente inteira.

Já para a plataforma espacenet foi feita restrições pois é uma plataforma mais genérica do que a WIPO, para isso as palavras chaves usadas foram procuradas apenas nos títulos das patentes com intuito de melhorar o resultado obtido.

Resultados e Discussões

Após a coleta dos dados por meio das chaves de busca, a etapa seguinte consistiu na análise das informações obtidas e a proporção de patentes relacionadas com a pesquisa para determinar qual estratégia de busca seria utilizada no estudo. A chave de busca escolhida pela WIPO foi a 1.2 e pela espacenet foi a 6.2, portanto a escolha interligou a proporção de patentes do código IPC pelos resultados gerais e pela análise qualitativa.

Pela WIPO:

Por meio da plataforma patentscope, com o objetivo de identificar documentos patentários principalmente nacionais relacionados a esmerilhadeiras e dispositivos de apoio ou suporte aplicados. A estratégia de busca utilizou termos para ampliar a abrangência dos resultados e contemplar diferentes formas de descrição da tecnologia nos documentos patentários. A consulta foi estruturada por meio de termos correlacionados ao presente trabalho.

Os termos "esmerilhadeira", "esmeril", "grinder" e "angle grinder" foram empregados para localizar documentos relacionados às ferramentas elétricas de desbaste e corte. Já os termos "apoio", "support" e "suporte" foram utilizados para identificar tecnologias envolvendo bases de sustentação, estruturas de fixação, suportes mecânicos e dispositivos auxiliares para operação dessas ferramentas. O período de busca foi delimitado entre 1º de maio de 2000 e 1º de maio de 2026, permitindo analisar a evolução tecnológica. Ademais, foram encontrados 24 resultados.

Através disso, patentes relevantes foram encontradas a fim de comparação ao presente estudo e servir de base para alavancar a prospecção tecnológica.

A primeira e mais relevante é a BR 102023000658, intitulada “Suporte para esmerilhadeira corte 65 graus porcelanato e revestimentos”, depositada em 12 de janeiro de 2023 e classificada em B24B 41. Ela aborda especificamente um suporte destinado à utilização de uma esmerilhadeira. Sua importância para a análise está principalmente na

possibilidade de comparação entre a estrutura de sustentação da ferramenta e a solução proposta neste projeto.

A segunda patente selecionada é a PI 0601524-7, intitulada “Esmeril angular”, depositada em 10 de maio de 2006 e classificada em B24B 47/00. O documento possui relação com o projeto por abordar diretamente uma esmerilhadeira angular e seus mecanismos de funcionamento. De acordo com a descrição publicada pelo INPI, a solução contempla elementos como acionamento da ferramenta, separação de partículas, sistema de escovas, monitoramento de sobrecarga e mecanismo de embreagem.

A terceira patente de interesse é a PI 1106838, intitulada “Ferramentas portáteis”, depositada em 16 de agosto de 2011 e classificada em B24B 23/00 e B24B 55/05. Sua relação com o projeto está associada à utilização de ferramentas elétricas portáteis e aos elementos destinados ao seu funcionamento e proteção.

A quarta patente selecionada é a BR 202021024944, intitulada “Disposição aplicada em kit para politriz, esmerilhadeira, lixadeira e similares para o espelhamento de mármore”, depositada em 9 de dezembro de 2021 e classificada em B24B 7. Essa patente apresenta uma relação importante com o projeto por considerar a utilização da esmerilhadeira juntamente com outros equipamentos e acessórios destinados ao processamento de superfícies. Sua relevância está na possibilidade de analisar como a ferramenta pode ser integrada a componentes auxiliares para executar determinadas operações.

Por fim, a quinta patente é a PI 1000075, intitulada “Dispositivos comutadores para ferramentas de potência”, depositada em 11 de janeiro de 2010. O documento possui relação com ferramentas elétricas e mecanismos de acionamento e bloqueio. A patente brasileira tem como objeto mecanismos de comutação, incluindo elementos de acionamento e travamento do interruptor.

A análise conjunta dessas cinco patentes demonstra que existem soluções anteriores relacionadas à esmerilhadeira angular, ferramentas elétricas, suportes, acessórios e mecanismos de acionamento, porém elas apresentam diferentes níveis de proximidade com a proposta desenvolvida. A BR 102023000658 é a referência mais próxima da solução estrutural, por tratar diretamente de um suporte para esmerilhadeira. As demais contribuem principalmente para o conhecimento do funcionamento da ferramenta, seus mecanismos de segurança, acessórios e possibilidades de integração com dispositivos auxiliares.

O principal diferencial identificado no projeto está, portanto, na integração de diferentes tecnologias em um único sistema, formado por suporte para esmerilhadeira, mesa de trabalho com regulagem vertical, sensor para identificação da altura do cotovelo do operador, sistema de controle e mecanismo eletromecânico responsável pelo posicionamento automático. Essa combinação busca adequar a altura da superfície de trabalho às características antropométricas do usuário, contribuindo para uma condição de trabalho mais ergonômica.

Pela espacenet:

Foi realizada uma busca tecnológica em bases de patentes com o objetivo de identificar documentos relacionados a esmerilhadeiras que apresentem adaptações envolvendo

sistemas de apoio ou suporte. Para isso, foram utilizados os termos “esmerilhadeira”, “esmeril”, “grinder” e “angle grinder”, combinados com os termos, “apoio”, “support” ou “suporte”. A pesquisa foi limitada ao período compreendido entre 1º de maio de 2000 e 1º de maio de 2026 e restrita à classificação IPC B24B, que engloba tecnologias relacionadas a processos e equipamentos de retificação, polimento, afiação e acabamento por abrasão. Diante disso, foram encontrados 133 resultados.

O objetivo da busca foi identificar soluções tecnológicas voltadas para o aprimoramento da utilização de esmerilhadeiras, especialmente por meio da incorporação de estruturas de apoio, suportes de fixação, bases estabilizadas e adaptações que aumentem a segurança, a precisão e a ergonomia durante a operação do equipamento.

A restrição à classe IPC B24B permitiu concentrar os resultados em documentos diretamente relacionados às operações de desbaste, corte, afiação e acabamento com ferramentas abrasivas, eliminando patentes de áreas não relacionadas. Dessa forma, os documentos recuperados apresentam maior relevância técnica para o estudo de dispositivos auxiliares destinados à adaptação de esmerilhadeiras.

Os resultados da busca contribuem para a identificação do estado da técnica existente, possibilitando a análise das principais soluções desenvolvidas ao longo dos últimos anos. Além disso, o levantamento auxilia na verificação de oportunidades para inovação e no desenvolvimento de novos dispositivos de apoio e suporte para esmerilhadeiras, reduzindo riscos de conflito com tecnologias já protegidas por patente e fornecendo subsídios para futuros projetos de pesquisa e desenvolvimento. Portanto a figura abaixo representa o direcionamento das patentes através do subgrupo.

Entre os documentos identificados na prospecção tecnológica, destacam-se patentes que apresentam elevada relevância para o tema de adaptações de apoio e suporte aplicadas a esmerilhadeiras. Essas tecnologias têm como objetivo principal aumentar a segurança, a estabilidade, a precisão e a versatilidade das operações realizadas com ferramentas abrasivas.

A patente CN224011935U, intitulada “Precise angle grinder support”, apresenta um suporte desenvolvido para proporcionar maior precisão no posicionamento e na operação de uma esmerilhadeira. A invenção está relacionada à utilização da ferramenta de forma apoiada, reduzindo a necessidade de o operador manter manualmente todo o peso e posicionamento do equipamento durante a execução da atividade.

A patente CN220007246U, denominada “Adjustable angle grinder limiting support”, apresenta um suporte ajustável destinado à utilização de uma esmerilhadeira. O principal aspecto de interesse para o projeto é a possibilidade de regular e limitar a posição da ferramenta, característica que contribui para maior estabilidade e controle durante a operação.

A patente CN214292468U, intitulada “Angle grinder support”, trata especificamente de uma estrutura destinada ao suporte de uma esmerilhadeira. Por apresentar uma solução voltada à sustentação da ferramenta, possui relação direta com a concepção estrutural do projeto em desenvolvimento. O uso de um suporte permite que a esmerilhadeira seja posicionada de maneira mais controlada durante a realização de operações de corte,

desbaste ou acabamento, podendo contribuir para a estabilidade e a segurança do processo.

A patente CN111906649A, denominada “Operation support frame of angle grinder”, apresenta uma estrutura de apoio destinada à operação de uma esmerilhadeira. A relação com o projeto é significativa porque ambas as soluções partem do princípio de utilizar uma estrutura de suporte para auxiliar o operador durante a utilização da ferramenta.

A patente CN212635316U, intitulada “Angle grinder support capable of moving front and back”, apresenta um suporte para esmerilhadeira que permite a movimentação da ferramenta na direção frontal e traseira. Essa característica é relevante para o projeto porque demonstra a utilização de mecanismos que possibilitam modificar a posição da esmerilhadeira em relação à estrutura de suporte, permitindo maior flexibilidade durante a operação.

A patente CN214980027U, intitulada “Angle grinder support”, apresenta um suporte desenvolvido especificamente para uma esmerilhadeira. A patente está relacionada pela estrutura de sustentação e fixação da ferramenta.

A patente CN219359134U, intitulada “Angle grinder support”, apresenta um suporte destinado à sustentação de uma esmerilhadeira durante sua utilização. Ela possui relação com o seu projeto por abordar a fixação e o posicionamento da ferramenta em uma estrutura de apoio.

A patente CN224011935U, intitulada “Precise angle grinder support”, apresenta um suporte para esmerilhadeira desenvolvido para proporcionar maior precisão no posicionamento e controle da ferramenta durante a operação.

A patente CN215433030U, intitulada “Novel angle grinder grinding support”, apresenta um suporte desenvolvido para auxiliar na utilização de uma esmerilhadeira durante operações de desbaste.

A patente CN213615897U, intitulada “Novel metal material angle grinder with sliding support”, apresenta um suporte deslizante para esmerilhadeira, permitindo movimentar e posicionar a ferramenta durante a operação.

A patente CN212635317U, relacionada a um suporte para esmerilhadeira, apresenta uma estrutura destinada a sustentar, posicionar e controlar a ferramenta durante a operação.

A patente CN220313038U, intitulada “Fixed cutting support of angle grinder”, apresenta um suporte fixo para esmerilhadeira destinado a auxiliar nas operações de corte. Ela possui relação com o seu projeto por utilizar uma estrutura para fixação e posicionamento da esmerilhadeira, proporcionando maior estabilidade durante o trabalho.

A patente CN213498419U, intitulada “Novel metal material angle grinder with sliding support”, apresenta um suporte deslizante para esmerilhadeira, permitindo movimentar e posicionar a ferramenta durante a operação.

A patente CN216126994U, intitulada “Plug-type angle grinder auxiliary stand”, apresenta um suporte auxiliar para esmerilhadeira angular, desenvolvido para facilitar a utilização da ferramenta e proporcionar maior estabilidade durante a operação.

A patente CN218312678U pode ser considerada relacionada ao seu projeto por estar inserida no campo de suportes e dispositivos auxiliares para esmerilhadeiras. Sua relevância está principalmente na possibilidade de apoiar e posicionar a ferramenta durante a operação

De modo geral, as patentes mencionadas evidenciam uma tendência tecnológica voltada ao desenvolvimento de adaptações, suportes e sistemas auxiliares para esmerilhadeiras. As soluções encontradas buscam aprimorar aspectos relacionados à ergonomia, segurança, precisão operacional e versatilidade de uso, demonstrando a relevância desse campo de inovação para aplicações industriais e profissionais.

Conclusão

A prospecção tecnológica realizada permitiu identificar o panorama geral das tecnologias relacionadas a adaptações de apoio e suporte para esmerilhadeiras, evidenciando a evolução das soluções desenvolvidas ao longo dos últimos anos. A análise das bases de patentes Wipo Patentscope e Espacenet Patents demonstrou que existe um número significativo de documentos voltados ao aprimoramento da segurança, estabilidade, ergonomia e precisão operacional dessas ferramentas.

Os resultados da Wipo Patentscope revelaram uma boa criatividade de patentes nacionais, tornando-se evidente uma interação entre ideias nacionais e internacionais. Já para Espacenet Patents demonstrou que a maior concentração de depósitos de patentes está localizada principalmente na China, refletindo a intensa atividade de pesquisa e desenvolvimento do país nesse segmento. Além disso, empresas consolidadas, como a Lunan Pharmaceutical Group Corporation, destacam-se entre os principais depositantes, demonstrando o interesse da indústria em desenvolver tecnologias que proporcionem maior eficiência e segurança ao operador.

A avaliação das principais patentes permitiu verificar que as soluções existentes se concentram principalmente em dispositivos de fixação, suportes estruturais, guias de movimentação e adaptações mecânicas. Entretanto, observou-se que ainda existem oportunidades para o desenvolvimento de novas tecnologias que integrem as esmerilhadeiras em diferentes aplicações.

Referências

BOSCH FERRAMENTAS. Loja Oficial Bosch Ferramentas. Disponível em:https://www.lojaboschferramentas.com.br/. Acesso em: 18 jun. 2026.

EPR CONSULTORIA. Ergonomia no trabalho. Disponível em:https://eprconsultoria.com.br/ergonomia-no-trabalho/. Acesso em: 18 jun. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ERGONOMIA E FATORES HUMANOS (ABERGO). ABERGO. Disponível em:https://www.abergo.org.br/. Acesso em: 18 jun. 2026.

FRANCESCHI, Alessandro de. Ergonomia. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria; Rede e-Tec Brasil, 2013. Disponível em:https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/11/12_ergonomia.pdf. Acesso em: 18 jun. 2026.

LYNUS. Manual do suporte de esmerilhadeira LSE-40. Araquari, SC: Lynus, 2019. Disponível em:https://www.lynus.com.br/download.php?arquivo=manuais%2Flse-40-suporte-de-esmerilhadeira-13.pdf. Acesso em: 18 jun. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 17: Ergonomia. Brasília: MTE, 2022.

IIDA, Itiro; GUIMARÃES, Lia Buarque de Macedo. Ergonomia: projeto e produção. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 11226: ergonomia: avaliação de posturas estáticas de trabalho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BRASIL. Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Disponível em:https://www.gov.br/inpi. Acesso em: 18 jun. 2026.

EUROPEAN PATENT OFFICE (EPO). Espacenet: patent search. Disponível em:https://worldwide.espacenet.com/. Acesso em: 18 jun. 2026.

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION (WIPO). PATENTSCOPE. Disponível em:https://patentscope.wipo.int/. Acesso em: 18 jun. 2026.

CÓDIGO: ET1046

AUTOR: ANA CLÁUDIA DE MEDEIROS DANTAS ALVES

ORIENTADOR: CARINA MAIA LINS COSTA

TÍTULO: Variabilidade da resistência à tração de geossintéticos

Resumo

Os métodos de dimensionamento de estruturas de solo reforçado com geossintéticos têm passado por uma evolução recente, caracterizada pela incorporação de análises probabilísticas voltadas à avaliação da confiabilidade estrutural. Essa evolução permite considerar as incertezas associadas às propriedades mecânicas dos materiais, em contraste com os procedimentos tradicionalmente determinísticos. Nesse contexto, o coeficiente de variação (CV) da resistência à tração dos geossintéticos constitui um parâmetro relevante para quantificar a dispersão dessa propriedade e avaliar sua influência sobre a segurança das estruturas. Este trabalho objetiva estabelecer valores representativos de CV para diferentes grupos de geossintéticos, fornecendo subsídios para o pré-dimensionamento e validação de parâmetros laboratoriais. A metodologia baseou-se na compilação de uma base de dados com 108 produtos descritos na literatura técnica, agrupados por tipo de geossintético e de polímero, seguida de análises estatísticas. Os resultados indicaram maior variabilidade nos geotêxteis não tecidos, além da predominância de distribuições assimétricas e da presença de valores atípicos que influenciam as medidas de tendência central. Como principal contribuição, propôs-se uma classificação baseada em percentis, permitindo a seleção de valores de CV com diferentes níveis de conservadorismo e a comparação da variabilidade de produtos reais com os valores observados na literatura.

Palavras-chave: Coeficiente de variação; Propriedades mecânicas; Solos reforçados.

TITLE: Tensile strength variability of geosynthetics

Abstract

Design methods for geosynthetic-reinforced soil structures have undergone recent developments, particularly through the incorporation of probabilistic analyses for structural reliability assessment. This approach consider mechanical properties uncertainties of the considered materials, in contrast to traditional deterministic procedures. In this context, the coefficient of variation (CV) of geosynthetics tensile strength is a relevant parameter for quantifying the dispersion of this property and assessing its influence on structural safety. This study aims to establish representative CV values for different groups of geosynthetics, providing a basis for preliminary

design and validation of parameters obtained from laboratory testing. The methodology consisted of compiling a database of 108 products reported in the technical literature, classified according to geosynthetic type and polymer type, followed by statistical analyses. The results indicated greater variability for nonwoven geotextiles, along with a predominance of asymmetric distributions and the presence of outliers affecting measures of central tendency. As the main contribution, a percentile-based classification was proposed, enabling the selection of CV values associated with different levels of conservatism and the comparison of the variability of actual products with values reported in the literature.

Keywords: Coefficient of variation; Mechanical properties; Reinforced soil.

Introdução

A ABNT NBR ISO 10318/2021 define “geossintético” como um produto constituído por pelo menos um polímero, sintético ou natural, empregado em contato com o solo e/ou outros materiais em aplicações de engenharia geotécnica ou civil. Suas principais funções são separação, proteção, filtração, drenagem, controle de erosão e reforço de solos, com aplicações em aterros sanitários, barragens de rejeitos, infraestrutura rodoviária e estruturas de solo reforçado. Esses materiais proporcionam eficiência construtiva e segurança estrutural, além de reduzir custos e impactos ambientais em relação aos métodos convencionais (Lima et al., 2025). Entre as aplicações em reforço, destacam-se os muros de solo reforçado com geossintéticos (SRG), constituídos por camadas de solo compactado intercaladas com reforços. Os geossintéticos melhoram as propriedades mecânicas do maciço, possibilitando faces verticais ou taludes íngremes, com menor volume de aterro e redistribuição das tensões internas (Ferreira, 2018). Tradicionalmente, o dimensionamento dessas estruturas utiliza métodos determinísticos baseados em fatores de segurança globais. Contudo, essa abordagem não estabelece relação formal com a probabilidade de falha e pode resultar em projetos excessivamente caros (Chalermyanont e Benson, 2004). Além disso, desconsidera as incertezas dos parâmetros de projeto, tratando propriedades como a resistência do solo e do reforço como valores fixos, embora sejam variáveis aleatórias caracterizadas por média, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) (Bathurst, 2025). Nesse sentido, Lesicar et al. (2024) verificaram, em ensaios de tração, que a resistência real de geotêxteis não tecidos pode ser até 35% inferior ao valor nominal declarado pelo fabricante. Assim, um mesmo fator de segurança aplicado a materiais distintos não implica necessariamente o mesmo nível de segurança probabilística, devido às diferentes incertezas de cada material (Bathurst e Naftchali, 2024). Além disso, o aumento da variabilidade, representada pelo CV, reduz a confiabilidade estrutural mesmo com fator de segurança nominal constante (Belo e Lima, 2020). Diante disso, abordagens probabilísticas baseadas na análise de confiabilidade vêm sendo utilizadas para incorporar as incertezas dos parâmetros de projeto, empregando indicadores como o índice de confiabilidade (β) e a probabilidade de falha (Pf). Nesse sentido, a resistência à tração do geossintético constitui uma variável aleatória que pode influenciar diretamente a confiabilidade da estrutura. Sua determinação é realizada por ensaios de tração conforme normas como ABNT NBR ISO 10319, NBR 12824 e ASTM D4595. No ensaio de tração em faixa larga, o material é submetido a carregamento crescente até a ruptura, sendo recomendados, no mínimo, 5 corpos de prova, permitindo o cálculo do CV e a caracterização da variabilidade da resistência.

Embora o CV deva ser obtido preferencialmente por ensaios do material específico de cada projeto, valores de referência são necessários para validar resultados e, em etapas de pré-projeto, quando ensaios ainda não estão disponíveis, estimar a variabilidade esperada. Apesar de sua importância nas análises probabilísticas, poucos estudos apresentam valores típicos de CV obtidos a partir de ampla base experimental. Na prática, é comum adotar um único valor para diferentes categorias de geossintéticos, desconsiderando diferenças associadas ao tipo de produto e ao polímero constituinte, o que pode gerar estimativas inadequadas.

Assim, este trabalho tem como objetivo estabelecer faixas de valores típicos do CV da resistência à tração máxima de geossintéticos empregados como reforço em muros de SRG, com base em resultados experimentais disponíveis na literatura. Os materiais foram agrupados segundo o tipo (geogrelhas, geotêxteis tecidos e não tecidos) e polímero (PET e PP), visando fornecer subsídios ao pré-dimensionamento e servir como ferramenta de comparação entre produtos reais e valores da literatura.

Metodologia

A base de dados foi obtida a partir de publicações disponíveis na literatura técnica por meio de buscas em bases indexadoras. Após o levantamento bibliográfico, obtiveram-se dados de ensaios de tração de diferentes geossintéticos referentes a um total de 228 produtos. Contudo, entre os produtos inicialmente selecionados, o coeficiente de variação da resistência à tração foi informado em cerca de 47% dos casos. Portanto, foram selecionados 108 produtos para desenvolvimento do trabalho, abrangendo estudos publicados entre 2003 e 2025, com um maior volume de dados concentrado nos anos de 2003, 2006, 2010 e 2016.

Foram analisados geossintéticos dos tipos geogrelha, geotêxtil tecido e geotêxtil não tecido, tanto de poliéster quanto de polipropileno. A Figura 1 mostra a proporção dos dados coletados em função do tipo de geossintético e do polímero.

Na maioria dos casos, as faixas de resistência à tração das geogrelhas identificadas na literatura correspondem a valores inferiores aos normalmente adotados para geogrelhas utilizadas como elementos de reforço em estruturas de solo reforçado. Em razão dessa discrepância, tais dados não foram considerados representativos para os propósitos desta pesquisa.

Para todas as geogrelhas e para todos os geotêxteis tecidos de PET, os valores do coeficiente de variação reportados correspondem à resistência à tração na direção de fabricação. Para os demais geossintéticos foram identificados ensaios realizados tanto na direção de fabricação quanto na direção transversal. Ressalta-se que o coeficiente de variação da resistência à tração corresponde a valores obtidos em ensaios de tração em faixa larga, conforme as normas ISO 10319, NBR 12824 ou ASTM D4595. Quanto ao número de corpos de prova utilizados para a obtenção do coeficiente de variação, as normas recomendam um mínimo de 5 corpos de prova. Para os 108 produtos analisados, o número de corpos de prova foi igual a cinco em 51,8% dos casos e superior a cinco em 5,6%. Em 42,63% dos produtos, essa informação não foi reportada.

No caso das geogrelhas, não foi possível identificar informações adicionais sobre o processo de fabricação na maioria dos casos (geogrelha tecida, extrudada, soldada, entre outros). No caso dos geotêxteis tecidos, o detalhamento da estrutura da manta (tecido de monofilamentos, multifilamentos laminetes, fitas planas, entre outros) também não foi reportado na maioria dos estudos. Apenas para geotêxteis não tecidos, o subtipo “agulhado” foi identificado na maioria dos trabalhos, como pode ser observado na

Figura 2, para diferentes condições do ensaio de tração: direção de fabricação e direção transversal.

Devido às características da base de dados coletada descritas anteriormente, foi possível analisar os valores de CV para os grupos de materiais mostrados na Tabela 1. Os grupos foram divididos em função do tipo de geossintético, polímero e direção que o ensaio de tração foi realizado.

Foram analisados grupos gerais, separando-os apenas por geossintético e polímero, sem fazer a distinção do subtipo, da gramatura do geossintético e nem da direção que o ensaio foi realizado, como mostrado na Tabela 1. Ou seja, os grupos englobam produtos de subtipos variados aplicáveis a cada grupo, com diversas faixas de gramatura, e com dados tanto de ensaios realizados na direção de fabricação, como ensaiados na direção transversal. Os produtos coletados para análise de geogrelhas e geotêxteis tecido foram todos ensaiados na direção de fabricação, por isso não houve distinção em função deste parâmetro.

A análise dos dados foi conduzida por meio de estatística descritiva, incluindo medidas de tendência central (média e mediana) e dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação). Adicionalmente, análises complementares foram feitas para os grupos considerados com maior representatividade, ou seja, com tamanho amostral de aproximadamente 25 observações. Primeiramente, foram elaborados diagramas de caixas (boxplots) com o objetivo de identificar valores discrepantes (outliers) e avaliar a dispersão dos dados. Para avaliar a forma da distribuição, o coeficiente de assimetria de Pearson (Ap) foi calculado conforme Equação 1. Na interpretação do coeficiente de assimetria, valores positivos de Ap correspondem a distribuições assimétricas positivas. Por outro lado, se o coeficiente resultar em valor negativo, a distribuição pode ser interpretada como assimétrica negativa. Por fim, caso o valor do coeficiente de assimetria possua valores muito próximos ou iguais a zero, a distribuição é simétrica.

Resultados e Discussões

A Tabela 2 exibe alguns parâmetros estatísticos iniciais a partir da análise dos dados. De forma específica, tem-se o valor médio, mediano, mínimo e máximo do coeficiente de variação em função do grupo de geossintéticos.

Quanto às médias de CV para cada grupo, é possível observar que as classes dos geotêxteis não tecidos (GTXNw) apresentaram as maiores médias, com valores de 11,61 e 8,30, destacando-se substancialmente dos demais grupos, que apresentaram médias semelhantes entre si, entre 3,54 e 3,79. Em geotêxteis não tecidos, essa variabilidade pode ser atribuída à sua estrutura composta por fibras dispostas aleatoriamente, que tendem a gerar maior variabilidade mecânica.

A maioria dos grupos apresentou valores de média e mediana muito próximos, indicando uma tendência de fraca assimetria. Os grupos que apresentaram maior variação entre média e mediana mostraram-se fortemente assimétricos, como será analisado posteriormente com os histogramas.

Com o objetivo de realizar uma avaliação mais robusta da distribuição e da variabilidade dos dados, análises complementares foram feitas em grupos selecionados. Diagramas de caixas (boxplots), análise da distribuição e histogramas foram construídos

apenas para os grupos com tamanho amostral superior a 25. Essa decisão baseou-se no fato de que amostras maiores tendem a representar de forma mais confiável a população, proporcionando estimativas mais estáveis da distribuição dos dados e maior confiabilidade na identificação de padrões, assimetrias e valores discrepantes (Runger e Montgomery, 1996).

Dessa forma, essas análises foram conduzidas exclusivamente para os grupos G3 e G4, que apresentaram número de observações suficiente para uma caracterização estatística mais representativa. A Figura 3 apresenta os diagramas de caixas para cada grupo mencionado. Observa-se a presença de valores discrepantes (outliers) em todos os conjuntos de dados. Esses resultados podem indicar que alguns dos produtos selecionados na literatura apresentam comportamento atípico, possivelmente decorrente de menor controle de qualidade durante a fabricação, variações inerentes ao processo produtivo, erros na execução dos ensaios de tração ou outros fatores experimentais que influenciam os resultados obtidos.

No que se refere ao grupo G3, composto por geotêxteis não tecido de poliéster ensaiados em ambas as direções, a posição da mediana dentro da caixa sugere leve assimetria negativa na região central da distribuição. Em concordância, o bigode inferior é levemente maior que o superior, indicando alongamento da cauda esquerda, caracterizando uma distribuição levemente assimétrica negativa.

Em relação ao grupo G4, dos geotêxteis não tecido de polipropileno ensaiados em ambas as direções, a mediana encontra-se deslocada para a base da caixa, o que indica uma assimetria positiva na região central. Esta tendência é amplificada pelo bigode superior levemente mais alongado e pela presença de dois valores atípicos na extremidade superior. Essa configuração indica uma distribuição fortemente assimétrica positiva, onde a maioria das amostras apresenta coeficientes de variação mais baixos, mas com alguns casos isolados de variabilidade muito elevada.

A Tabela 3 apresenta os valores de coeficiente de assimetria de Pearson. Os resultados indicam que os grupos das geogrelhas e geotêxteis tecidos apresentaram distribuição assimétrica positiva, caracterizada por uma concentração de valores mais baixos e presença de valores elevados, formando uma cauda à direita. Já os grupos dos geotêxteis não tecidos, um deles apresentou distribuição positiva e outro indicou assimetria negativa, com valores de coeficiente de variação da resistência à tração mais altos e poucos valores mais baixos, formando uma cauda à esquerda.

As Figuras 4 e 5 apresentam histogramas de cada conjunto de dados selecionado para análise.

Na Figura 4, tangente ao grupo G3, apesar da análise do boxplot e do valor do coeficiente de assimetria do grupo indicar uma assimetria negativa (à esquerda), observa-se que a tendência da distribuição é ligeiramente mais próxima à de uma distribuição assimétrica positiva, com uma cauda direita pouco pronunciada. Isso se deve à proximidade de valores entre a média e mediana.

Para o histograma do conjunto G4 apresentado na Figura 5, observou-se a falta de dados para um intervalo, por volta de 18% a 20%, e falta de continuidade na distribuição, indicando uma maior concentração de dados em faixas específicas e escassez em outras.

Observa-se neste histograma uma cauda direita bastante pronunciada e extensa. Essa característica gera uma discrepância significativa entre a média e a mediana, indicando uma forte assimetria positiva.

Em suma, observou-se a presença de lacunas de dados em faixas específicas nos histogramas, interrompendo a continuidade das distribuições e sugerindo maior concentração de observações em determinados intervalos. Além disso, o grupo G4 apresentou assimetria positiva, caracterizada por cauda à direita mais pronunciada, enquanto o histograma do grupo G3 indicou assimetria negativa, com sua cauda direita mais curta. Em relação às medidas de tendência central, verificou-se que o grupo G3 apresentou valores de média e mediana bastante próximos, com a mediana ligeiramente superior à média. Por outro lado, no grupo G4, observou-se uma diferença mais acentuada entre essas medidas, sendo a mediana inferior à média, o que reforça a influência da assimetria positiva sobre a distribuição dos dados.

Devido ao comportamento assimétrico dos dados, o uso do CV médio pode ser questionado, pois a média pode não retratar adequadamente a tendência central do conjunto. A análise conjunta da média e da mediana dos grupos evidencia diferentes comportamentos quanto à representatividade dessas medidas para estimar o CV típico. No grupo G3, a média, correspondente a 11,6%, pode ser considerada uma estimativa adequada da variabilidade característica do grupo, uma vez que o histograma indica maior concentração dos dados em torno desse valor. Em contraste, no grupo G4, a discrepância observada entre a média e a mediana sugere cautela ao utilizar apenas a média, pois ela pode estar superestimando a variabilidade típica.

A partir da análise estatística dos coeficientes de variação compilados neste estudo, propõe-se uma classificação baseada em percentis para subsidiar a definição de valores de CV no dimensionamento de solos reforçados com geossintéticos. Essa classificação, apresentada na Tabela 4, associa diferentes percentis da distribuição dos dados a níveis de conservadorismo, fornecendo um critério objetivo para a seleção do valor de projeto em função da variabilidade observada e do grau de segurança desejado.

A Tabela 4 apresenta uma classificação dos valores de CV com base em diferentes percentis, permitindo relacionar o nível de variabilidade considerado à sua influência no dimensionamento. Observa-se que, quanto menor o percentil adotado, menor é o valor de CV utilizado como referência e, consequentemente, menor tende a ser o impacto da variabilidade sobre a resistência à tração considerada no projeto, resultando em um menor fator de redução associado a esse efeito.

Assim, os percentis P10 e P90 correspondem, respectivamente, a níveis de variabilidade inferiores e superiores aos observados na maior parte dos estudos, representando valores de CV menos frequentemente encontrados na literatura. Ressalta-se, contudo, que esses valores não são improváveis ou impossíveis de ocorrer, mas apenas apresentam menor frequência de ocorrência na base de dados analisada. Os percentis intermediários, P25, P50 e P75, representam diferentes níveis de conservadorismo na consideração da variabilidade, permitindo ajustar o impacto sobre a resistência de projeto de acordo com a criticidade e o grau de incerteza associado à aplicação. Destaca-se que o P50 corresponde à mediana dos valores de CV, representando o comportamento central da base de dados, enquanto o P25 e o P75 delimitam, respectivamente, os valores abaixo dos quais se encontram 25% e 75% das observações.

Os valores de CV para os percentis de cada grupo estão dispostos na Tabela 5.

É fundamental ressaltar que a caracterização estatística apresentada neste estudo possui caráter referencial e não substitui a análise específica dos materiais a serem empregados em projetos reais. No contexto de muros de solo reforçado, este trabalho serve para auxílio ao dimensionamento em etapas de pré-projeto na ausência de dados específicos dos geossintéticos ou como um instrumento de avaliação comparativa, permitindo contrastar a variabilidade medida nos produtos reais com as distribuições e valores típicos observados na literatura. Essa comparação é importante para validar os parâmetros de projeto e garantir a confiabilidade estrutural diante da variabilidade inerente aos geossintéticos.

Conclusão

Este trabalho realizou uma análise estatística do coeficiente de variação (CV) da resistência máxima à tração de geossintéticos, fundamentada em uma base de dados compilada da literatura técnica. Foram avaliadas geogrelhas, geotêxteis tecidos e geotêxteis não tecidos de poliéster e polipropileno. O estudo buscou preencher uma lacuna na literatura ao propor faixas referenciais de variabilidade para subsidiar o dimensionamento e análises de confiabilidade em obras de solo reforçado.

Os resultados indicaram que os geotêxteis não tecidos apresentam uma variabilidade substancialmente superior aos demais grupos, característica atribuída à sua estrutura composta por fibras dispostas de forma aleatória. Observou-se que a maioria dos grupos de geossintéticos analisados possui distribuições assimétricas, com a presença frequente de valores discrepantes que influenciam significativamente as medidas de tendência central. A pesquisa possibilitou a proposição de uma classificação baseada em percentis, que permite aos projetistas selecionar valores de projeto com diferentes níveis de conservadorismo, servindo como uma ferramenta de análise comparativa para validar parâmetros de produtos reais frente ao comportamento típico observado na literatura técnica.

Para pesquisas futuras, propõe-se a ampliação da base de dados, de modo a aumentar a robustez e a representatividade estatística dos resultados, bem como a aplicação de ferramentas estatísticas adicionais, como testes de normalidade, a fim de aprofundar a análise e a interpretação dos dados. Sugere-se também a investigação de subgrupos específicos baseados em detalhes técnicos que frequentemente são omitidos na literatura técnica, tais como os processos de fabricação de geogrelhas nas formas extrudadas, tecidas ou soldadas. No caso dos geotêxteis tecidos, seria relevante analisar o impacto do tipo de fio ou fita, abrangendo variações como fita plana, fita fibrilada, monofilamento, multifilamento ou componentes híbridos. Por fim, propõe-se expandir a análise estatística do coeficiente de variação para outras propriedades mecânicas e hidráulicas, a exemplo da resistência ao arrancamento ou do comportamento sob fluência, visando verificar se padrões de variabilidade semelhantes aos da resistência à tração são observados em outros parâmetros fundamentais para o dimensionamento e para a confiabilidade das obras em longo prazo.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 10318-1:2021: Geossintéticos — Parte 1: Termos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BATHURST, Richard J. Developments in reliability-based design for reinforced soil structures. E3S Web of Conferences, v. 662, art. 03002, 2025. DOI: 10.1051/e3sconf/202566203002

BATHURST, Richard J.; NAFTCHALI, Fahimeh M. Geosynthetic reinforcement stiffness for analytical and numerical modelling of reinforced soil structures. Geotextiles and Geomembranes, v. 49, n. 4, p. 921–940, 2021. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2021.01.003.

BELO, Jean Lucas dos Passos; LINS DA SILVA, Jefferson. Reliability analysis of a controlled stage-constructed and reinforced embankment on soft ground using 2D and 3D models. Frontiers in Built Environment, v. 5, art. 150, 2020. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00150.

CHALERMYANONT, Tanit; BENSON, Craig H. Reliability-Based Design for Internal Stability of Mechanically Stabilized Earth Walls. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Reston, v. 130, n. 2, p. 163–173, 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:2(163).

FERREIRA, D. da F. Análise de confiabilidade de estruturas de contenção com solo arenoso reforçado com geotêxtil. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

LIMA, A. S.; FURTADO, I. A.; FONSECA, T. M.; INÁCIO, V. H. M. de O.; ALMEIDA, J. R. de; MARTINS, C. de P. Study of the application of geosynthetics in geotechnical works. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 1536, n. 1, art. 012038, 2025. DOI: 10.1088/1755-1315/1536/1/012038.

LESIČAR, A.; KAVUR, B.; SERDAREVIĆ, E.; SAVI, R. Testing of tensile properties of two nonwoven geotextiles. Environmental Engineering – Inženjerstvo okoliša, v. 10, n. 1-2, p. 12–18, 2023. DOI: 10.37023/ee.10.1-2.2.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Applied statistics and probability for engineers. 7. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.

Anexos



Figura 1a: Distribuição dos dados por tipo de geossintético e polímero. (a) Poliéster.



Figura 1b: Distribuição dos dados por tipo de geossintético e polímero. (b) Polipropileno



Figura 2a: Distribuição dos geotêxteis não tecidos entre o tipo agulhado e aqueles com tipo não reportado. (a) Geotêxteis não tecido de poliéster ensaiados na direção de fabricação.



Figura 2b: Distribuição dos geotêxteis não tecidos entre o tipo agulhado e aqueles com tipo não reportado. (b) Geotêxteis não tecido de polipropileno ensaiados na direção de fabricação.



Tabela 1. Informações gerais dos grupos de geossintéticos avaliados.



Equação 1: Coeficiente de assimetria de Pearson



Tabela 2. Parâmetros estatísticos do coeficiente de variação de cada grupo de geossintético.



Tabela 3. Coeficientes de assimetria de Pearson obtidos para a distribuição do CV.



Figura 4. Histograma – Grupo G3



Figura 5. Histograma – Grupo G4



Tabela 4. Classes de dimensionamento.



Tabela 5. Valores dos percentis para cada grupo.



Figura 3. Diagramas de caixas de cada grupo selecionado, com outliers.

CÓDIGO: ET1070

AUTOR: GUSTAVO GUILHERME WANDERLEY

ORIENTADOR: PABLO JAVIER ALSINA

TÍTULO: Arquitetura de Hardware e Software para dispositivos de Auxílio à Locomoção

Resumo

A mobilidade é um fator importante na qualidade de vida humana. A perda da capacidade de caminhar impacta diretamente a maioria das atividades diárias. Na última década, vimos o uso crescente de dispositivos robóticos, como andadores inteligentes e exoesqueletos, na reabilitação da marcha e na marcha assistida. O uso de dispositivos robóticos apresenta diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais de reabilitação, pois é possível utilizar seus sensores embarcados para monitorar a evolução do paciente, desde que o processo de reabilitação seja facilmente customizado de acordo com o perfil específico do paciente. Neste artigo, propomos o uso conjunto de Andadores Robóticos Inteligentes e Exoesqueletos Robóticos em aplicações de reabilitação. Apresentamos desenvolvimentos preliminares de um andador robótico inteligente e de um exoesqueleto robótico para fins de reabilitação da marcha. As potenciais vantagens e desvantagens do uso de ambos os dispositivos em conjunto nos tratamentos de reabilitação de movimento são discutidas.

Palavras-chave: Marcha Humana, Reabilitação Robótica, Dispositivo Assistivo Robótico

TITLE: Hardware and Software Architecture for Locomotion Assistive Devices

Abstract

Mobility is an important factor in human quality of life. Loss of walking abilities directly impacts most daily activities. In the last decade, we have seen the increasing use of robotic devices, such as smart walkers and exoskeletons, in march rehabilitation and assistive walking. The use of robotic devices has several advantages over traditional rehabilitation methods, since it is possible to use their embedded sensors to monitor patient evolution, as long as the rehabilitation process is easily customized according to the patient's specific profile. In this paper, we propose the use of Robotic Smart Walkers and Robotic Exoskeletons together in rehabilitation applications. We present preliminary developments of a robotic smart walker and a robotic exoskeleton for gait rehabilitation purposes. The potential advantages and disadvantages of using both devices together in movement rehabilitation treatments are discussed.

Keywords: Human Gait, Robotic Rehabilitation, Robotic Assistive Device

Introdução

A marcha humana pode ser comprometida por diversas condições de saúde, tais como: traumas ósseos ou musculares, acidentes vasculares cerebrais (AVC), lesões na medula espinhal e doença de Parkinson. Além disso, a perda da função física ou cognitiva devido ao envelhecimento também pode impactar a qualidade da marcha. De acordo com o Departamento de Economia (2024) das Nações Unidas, espera-se que a população mundial com mais de 65 anos de idade aumente de aproximadamente 800 milhões em 2025 para 1,6 bilhão até 2050. O AVC afeta milhares de pessoas em todo o mundo todos os anos. É a principal causa de incapacidade em adultos, levando à perda significativa do controle da marcha, de acordo com Calabro et al. (2015). O AVC pode causar sequelas graves nos indivíduos, como limitação ou perda de movimento nos membros inferiores, impossibilitando o indivíduo de caminhar, ou causando dificuldades de mobilidade e equilíbrio devido à perda do controle articular independente e à redução da força nas extremidades inferiores.

O foco principal do processo de reabilitação física é a recuperação da marcha, devido à importância da locomoção nas atividades diárias em casa, no trabalho ou na comunidade. Neste contexto, nos últimos anos tem havido um interesse crescente no uso de tecnologias robóticas assistivas para reabilitação da marcha, com destaque particular para os andadores inteligentes (Neto et al., 2015) e exoesqueletos robóticos (Gorgey, 2018).

Instituições de pesquisa públicas e privadas têm focado no desenvolvimento de órteses ativas para assistência à marcha e reabilitação de membros inferiores. As empresas Rex Bionics (Nova Zelândia), Exo Bionics (EUA) e Argo Medical Technologies (Israel) ganharam destaque mundial pelo lançamento no mercado de exoesqueletos para marcha assistida.

No Brasil, a Universidade de São Paulo - USP São Carlos, a Universidade Federal do Espírito Santo - UFES (Elias-Neto et al., 2019) e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN (Araujo et al., 2015) destacam-se como instituições que vêm desenvolvendo exoesqueletos para fins de reabilitação e marcha assistida (De Gaitani et al., 2022; Elias-Neto et al., 2019 e Araujo et al., 2015). A UFES e a UFRN também estão desenvolvendo protótipos de Andadores Inteligentes (Júnior e de Carvalho, 2021; Oliveira, 2025).

Neste artigo, descrevemos dois protótipos robóticos em desenvolvimento para fins de reabilitação da marcha: um andador inteligente e um exoesqueleto. Discutimos as potenciais vantagens e desvantagens de usar ambos os dispositivos em conjunto. O restante do artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2, são resumidas as principais características dos dispositivos robóticos assistivos para reabilitação da marcha. Os dispositivos robóticos desenvolvidos pelo nosso grupo são apresentados na seção 3. As vantagens potenciais esperadas da integração de andadores inteligentes com exoesqueletos na reabilitação robótica são discutidas na seção 4. Por fim, na seção 5, destacamos as principais conclusões do trabalho e discutimos as perspectivas de desenvolvimentos futuros.

Metodologia

2. DISPOSITIVOS ROBÓTICOS PARA ASSISTÊNCIA E REABILITAÇÃO DA MARCHA Nos últimos anos, houve um progresso significativo no uso de dispositivos robóticos assistivos para reabilitação. Esses dispositivos possibilitaram novas terapias, mais customizadas e eficientes. Ao fornecer feedback sensorial e motor, além de monitoramento em tempo real e registro sistemático de dados, permitem adaptar os procedimentos terapêuticos ao paciente, alcançando maior adaptabilidade, precisão e repetibilidade que as terapias convencionais. Alguns incorporam feedback háptico, visual e auditivo, amplificando a neuroplasticidade e acelerando o tratamento (Banyai e Brişan, 2024). Entre os dispositivos mais comuns estão andadores inteligentes e exoesqueletos:

2.1 Andadores Inteligentes São dispositivos mecânicos projetados para assistência à mobilidade, combinando suporte físico, sensores e robótica para melhorar a segurança e a eficiência da locomoção. Diferente dos andadores convencionais, são equipados com sensores para detectar o ambiente, executar algoritmos de estabilidade e controle da marcha, e apresentar interfaces usuário-robô (Jiménez et al., 2019). A motivação principal é aumentar a independência de pessoas com mobilidade reduzida. Andadores comuns exigem força, dificultam a transposição de obstáculos e não se adaptam ao usuário. Assim, os robóticos fornecem assistência cognitiva, física e sensorial, prevenindo quedas e permitindo monitoramento clínico (Neto et al., 2015; Frizera-Neto et al., 2011; Valadão et al., 2016).

2.2 Exoesqueletos São dispositivos robóticos vestíveis projetados para apoiar, auxiliar ou aprimorar o movimento humano. Podem ser rígidos ou flexíveis, motorizados ou passivos, usados nos membros ou tronco. Utilizam atuadores (motores elétricos) e sensores para detectar a intenção do usuário e fornecer assistência mecânica em articulações como quadril, joelho e tornozelo. São aplicados em reabilitação, atividades diárias, suporte industrial e militar (Lv et al., 2018; Sawicki et al., 2020; Tiboni et al., 2022). A estrutura mais comum em órteses ativas de membros inferiores controla os ângulos do quadril e joelho no plano sagital, com tornozelos fixos ou passivos (com molas). O equilíbrio é controlado pelo usuário com o auxílio de muletas ou andador.

3. DISPOSITIVOS EM DESENVOLVIMENTO Descrevemos os dispositivos robóticos para assistência à marcha em desenvolvimento pelo nosso grupo: o andador robótico inteligente Ambulus e o exoesqueleto robótico Ortholeg 2.0.

3.1 Andador Robótico Inteligente Ambulus O Ambulus foi desenvolvido adaptando-se um andador passivo comercial de alumínio. Para locomoção autônoma, sua cinemática inclui base móvel com duas rodas dianteiras de acionamento diferencial e duas traseiras passivas (rodízio). As rodas dianteiras possuem motores DC (12V) acionados por drivers de potência, com velocidades medidas por encoders e controladas por um microcontrolador embarcado. Um computador Beaglebone Blue gerencia a navegação, localizando o dispositivo via fusão de odometria (encoders) e Unidade de Medida Inercial. O sistema inclui sensor ultrassônico (mede a distância das pernas) e câmera RGB-D frontal (mapeamento e detecção de obstáculos). Um Raspberry Pi processa a

nuvem de pontos da câmera e realiza o processamento de alto nível (interação robô-humano-ambiente, planejamento de movimento e interface).

3.2 Ortholeg 2.0 3.2.1 Estrutura Mecânica O Ortholeg 2.0 é uma órtese ativa com estrutura leve de tubos de alumínio e juntas rotacionais (2-DOF por perna). Usinadas em alumínio 7075, as juntas garantem alta resistência e baixo peso. Cada junta é acionada por motor DC de 150 W (Maxon RE40) com redução de engrenagem e encoder incremental, permitindo controle preciso. O tornozelo incorpora palmilha de fibra de carbono para uso interno no calçado, garantindo fixação segura, flexibilidade e transmissão de força. A estrutura superior inclui suporte lombar em termoplástico acrílico e mochila integrada para baterias e circuitos, garantindo autonomia.

3.2.2 Arquitetura de Hardware do Ortholeg 2.0 A arquitetura baseia-se em processamento de alto nível e controle distribuído. O computador central (Raspberry Pi 3) executa algoritmos de marcha, processa dados, gerencia estados operacionais e a Interface Homem-Máquina (IHM). O controle de baixo nível (respostas rápidas) utiliza microcontroladores Arduino Nano para leitura de encoders, processamento de sinais, controle de velocidade/posição e comandos às juntas. Placas BTS7960 (ponte H) acionam os motores Maxon RE40, controlando velocidade e direção com eficiência e proteção contra sobrecorrente.

3.2.3 Controle de Posição Angular nas Articulações O Ortholeg 2.0 possui sistema de controle de posição angular dedicado para quadris e joelhos, permitindo movimentos precisos que respeitam a biomecânica humana. Quatro Arduinos Nano® (um por junta) recebem leituras contínuas dos encoders. Eles ajustam velocidade e torque para que cada articulação siga a trajetória de referência. Os módulos BTS7960 fornecem a energia necessária e controlam direção e torque para operação estável.

Resultados e Discussões

4. INTEGRAÇÃO DE ANDADORES INTELIGENTES E EXOESQUELETOS NA REABILITAÇÃO Alguns tratamentos de reabilitação da marcha que utilizam exoesqueletos ativos são realizados em esteira, como é o caso do dispositivo comercial Lokomat. A reabilitação convencional em esteira proporciona um ambiente consistente e controlado para a terapia e auxilia na recuperação de uma ampla gama de condições, como AVC, artroplastia de joelho e lesões ligamentares. A reabilitação em esteira também ajuda a melhorar a velocidade e a resistência da marcha por meio de treinamento específico da tarefa. Apesar destas vantagens, pode ser cara e ocupar muito espaço. Além disso, o impacto da superfície da esteira pode ser muito forte para alguns pacientes.

Ademais, os exercícios convencionais de fisioterapia em esteira impõem uma marcha regular e antinatural. Por outro lado, andadores robóticos inteligentes ou exoesqueletos permitem ao paciente realizar a reabilitação do movimento caminhando por diversos percursos, sem se limitar ao padrão de marcha uniforme imposto por uma esteira. Embora a caminhada humana seja de natureza cíclica e repetitiva, sua dinâmica não é estritamente periódica, exibindo pequenas variações naturais de uma passada para outra.

Essas variações, chamadas de variabilidade da marcha, são sutis e normais, resultando da complexa interação entre os sistemas nervoso, musculoesquelético e cardiorrespiratório, bem como de fatores momentâneos externos e internos.

Andadores robóticos inteligentes e exoesqueletos não se limitam a um ambiente específico, permitindo que os exercícios de reabilitação sejam realizados em ambientes internos e externos, sem as restrições de marcha impostas pelas esteiras. Assim, a realização de exercícios de reabilitação com andador robótico inteligente ou exoesqueletos permite estimular uma dinâmica de marcha mais rica, não alcançada com o uso de esteira. Esperamos que isso possibilite acelerar o processo de neuroplasticidade necessário para a reabilitação dos movimentos dos membros inferiores.

Os exoesqueletos podem ser muito caros e ainda são uma tecnologia relativamente nova, mas, com os crescentes avanços na tecnologia da robótica comercial, processos de produção acessíveis e economia de escala, os preços dos hardwares estão caindo, o que se refletirá em custos mais baixos para dispositivos robóticos assistivos e de reabilitação. Um problema com órteses ativas assistivas é o seu potencial para lesões por pressão na pele devido às tiras, especialmente para aqueles com sensibilidade diminuída. Apesar disso, a reabilitação com exoesqueleto permite que pacientes com graves problemas de mobilidade fiquem de pé e caminhem, promove a independência e ajuda a melhorar a circulação, reduzir a rigidez muscular e prevenir complicações como escaras de pressão e contraturas articulares.

Além disso, a reabilitação com exoesqueleto pode melhorar o equilíbrio, a força e os escores funcionais e, assim como os andadores robóticos inteligentes, os exoesqueletos podem ser usados para realizar exercícios de caminhada em ambientes internos e externos, não se limitando a um local fixo específico, como é o caso da reabilitação em esteira.

A maioria dos exoesqueletos comerciais para assistência à marcha incorpora o uso de muletas para garantir o equilíbrio do usuário durante a caminhada. O uso de um andador robótico inteligente no lugar de muletas, em conjunto com um exoesqueleto, pode ajudar a manter o equilíbrio da mesma forma e também permite a incorporação de suas funcionalidades específicas no tratamento de reabilitação.

Uma vantagem óbvia do uso de andadores robóticos inteligentes e exoesqueletos, seja separadamente ou integrados, é que eles permitem medição de alta precisão e geração de perfis de torque e velocidade específicos de movimento para exercícios de reabilitação física direcionados.

O uso integrado de exoesqueletos com andadores robóticos inteligentes em tratamentos de reabilitação permite o monitoramento de pacientes em tempo real utilizando os sensores presentes em ambos os dispositivos, fornecendo ao fisioterapeuta um conjunto de dados mais completo sobre seu desempenho. Isso permite decisões mais embasadas sobre o tratamento em andamento e os ajustes que podem ser necessários no processo de reabilitação.

Outra vantagem do uso integrado de andadores robóticos inteligentes e exoesqueletos na reabilitação é a conectividade, presente na maioria dos dispositivos robóticos assistivos, que abre a possibilidade de telemedicina, minimizando a necessidade de deslocamento

do paciente ou do terapeuta, reduzindo a equipe de funcionários e permitindo tratamentos mais contínuos.

A Figura 7 ilustra o desempenho dos motores nas articulações do joelho (gráfico superior) e do quadril (gráfico inferior) durante o rastreamento de uma trajetória. Os resultados comparam a posição angular alvo, representada pela linha tracejada azul, com a posição atual medida em cada junta, indicada pelas linhas contínuas vermelha e verde, respectivamente. A análise das curvas evidencia que o sistema de controle embarcado consegue seguir adequadamente os perfis de referência ao longo do tempo (entre 2 e 12 segundos). Embora seja possível notar um discreto atraso, característico da dinâmica mecânica e do tempo de resposta dos atuadores físicos, as posições reais acompanham as posições desejadas de forma consistente, reproduzindo as variações angulares necessárias (como o pico de flexão do joelho próximo a 30 graus e a extensão/flexão do quadril variando entre -12 e 15 graus). Isso comprova a eficácia da arquitetura de controle de baixo nível na execução de movimentos articulares suaves e precisos para a marcha.

Conclusão

A introdução de dispositivos robóticos nos processos de reabilitação é relativamente recente. Exoesqueletos e andadores robóticos inteligentes são tecnologias promissoras, dadas as suas funcionalidades não disponíveis nos processos de reabilitação tradicionais. Embora ainda relativamente caros, com a diminuição do custo de hardware e dos processos de produção, aliados às economias de escala, andadores robóticos inteligentes e exoesqueletos tendem a se tornar cada vez mais acessíveis, tornando-os uma alternativa terapêutica promissora. Neste contexto, esses dispositivos robóticos assistivos estão remodelando a reabilitação da marcha, proporcionando oportunidades sem precedentes para intervenções terapêuticas personalizadas, intensivas e envolventes.

O uso combinado de exoesqueletos e andadores robóticos inteligentes promete incorporar melhorias nos tratamentos de reabilitação que não estão disponíveis na fisioterapia convencional em esteira. A diversidade de sensores embarcados nos dispositivos robóticos possibilita monitorar com maior precisão o quadro do paciente durante os exercícios de fisioterapia, bem como registrar dados para futura análise da evolução clínica do tratamento.

Recursos de navegação autônoma, combinados com técnicas de interação robô-humano-ambiente comumente encontradas em sistemas robóticos assistivos, permitem que os fisioterapeutas programem exercícios mais complexos, livres das restrições espaciais do tratamento convencional em esteira e adaptados às necessidades específicas de cada paciente. Em particular, a possibilidade de realizar exercícios de reabilitação sem a imposição de uma marcha uniforme inerente aos exercícios em esteira e sem as suas restrições espaciais permite estimular uma dinâmica de marcha mais rica. Com isso, esperamos que os processos de neuroplasticidade sejam intensificados, resultando em uma aceleração dos tratamentos.

A conectividade comumente encontrada em dispositivos robóticos abre portas para aplicações onde o paciente e o fisioterapeuta não estão necessariamente juntos no mesmo espaço físico. Assim, o uso integrado de andadores robóticos inteligentes e exoesqueletos permitirá a incorporação natural das vantagens inerentes à telemedicina.

Nesse contexto, este artigo apresentou os dispositivos robóticos assistivos Ambulus, um andador robótico inteligente, e Ortholeg 2.0, um exoesqueleto para membros inferiores, que estão sendo desenvolvidos pelo nosso grupo. Atualmente, os sistemas eletromecânicos dos dispositivos foram concluídos e suas arquiteturas de hardware e software embarcadas foram projetadas e estão sendo implementadas e testadas. Os próximos passos envolvem concluir a implementação dos dois dispositivos e desenvolver uma interface para seu uso integrado em procedimentos de reabilitação robótica. Após a conclusão, esperamos validá-los em ensaios clínicos no mundo real.

Referências

Araujo, M.V., Alsina, P.J., Roza, V.C.C. and Melo, N.B., 2015. "Powered orthosis ortholeg: Design and development". IEEE Latin America Transactions, Vol. 13, No. 1, pp. 90-95.

Banyai, A.D. and Brisan, C., 2024. "Robotics in physical rehabilitation: systematic review". In Healthcare. MDPI, Vol. 12, p. 1720.

Calabro, R.S., Naro, A., Russo, M., Leo, A., Balletta, T., Sacca, I., De Luca, R. and Bramanti, P., 2015. "Do post-stroke patients benefit from robotic verticalization? a pilot-study focusing on a novel neurophysiological approach". Restorative neurology and neuroscience, Vol. 33, No. 5, pp. 671-681.

De Gaitani, F., dos Santos, W. and Siqueira, A.A.G., 2022. "Design and performance analysis of a compact series elastic actuator for exoskeletons". Journal of Control, Automation and Electrical Systems, Vol. 33, No. 3, pp. 1012-1021.

Elias-Neto, A., Villa-Parra, A.C., Botelho, T., Frizera-Neto, A. and Bastos-Filho, T., 2019. "A robotic lower-limb exoskeleton for rehabilitation". In Latin American Conference on Biomedical Engineering. Springer, pp. 1130-1136.

Frizera-Neto, A., Ceres, R., Rocon, E. and Pons, J.L., 2011. "Empowering and assisting natural human mobility: The simbiosis walker". International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 8, No. 3, p. 29.

Gorgey, A.S., 2018. "Robotic exoskeletons: The current pros and cons". World journal of orthopedics, Vol. 9, No. 9, p. 112.

Jiménez, M.F., Monllor, M., Frizera, A., Bastos, T., Roberti, F. and Carelli, R., 2019. "Admittance controller with spatial modulation for assisted locomotion using a smart walker". Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 94, No. 3, pp. 621-637.

Júnior, R. and de Carvalho, J., 2021. "Design and implementation of electronic architecture for cloud robotics and human-robot-environment interaction strategy applied to smartwalker". Master Thesis, Federal University of Espírito Santo, Vitória, Brazil.

Lv, G., Zhu, H. and Gregg, R.D., 2018. "On the design and control of highly backdrivable lower-limb exoskeletons". IEEE Control Systems Magazine, Vol. 38, No. 6, pp. 88-113.

Neto, A.F., Elias, A., Cifuentes, C., Rodriguez, C., Bastos, T. and Carelli, R., 2015. "Smart walkers: Advanced robotic human walking-aid systems". In Intelligent Assistive Robots: Recent Advances in Assistive Robotics for Everyday Activities, Springer, pp. 103-131.

of Economic, D., 2024. World Population Prospects 2024: Summary of Results. Stylus Publishing, LLC.

Oliveira, A.T.d., 2025. "Localização relativa de um andador robótico inteligente baseada em fusão de sinais por filtro de informação estendido".

Sawicki, G.S., Beck, O.N., Kang, I. and Young, A.J., 2020. "The exoskeleton expansion: improving walking and running economy". Journal of neuroengineering and rehabilitation, Vol. 17, No. 1, p. 25.

Tiboni, M., Borboni, A., Vérité, F., Bregoli, C. and Amici, C., 2022. "Sensors and actuation technologies in exoskeletons: A review". Sensors, Vol. 22, No. 3, p. 884.

Valadão, C., Caldeira, E., Bastos-Filho, T., Frizera-Neto, A. and Carelli, R., 2016. "A new controller for a smart walker based on human-robot formation". Sensors, Vol. 16, No. 7, p. 1116.

Anexos



Junta do exoesqueleto



Exoesqueleto





Arquitetura de Hardware



Gráfico de desempenho da trajetória

CÓDIGO: ET1097

AUTOR: MARIA CLARA MARTINS LOURENCO

ORIENTADOR: JOSE HERIBERTO OLIVEIRA DO NASCIMENTO

TÍTULO: Otimização da Síntese de Nanopartículas de Fibroina da seda para potencial em nanoencapsulamento.

Resumo

A nanotecnologia apresenta grande potencial para o desenvolvimento de sistemas de liberação controlada de bioativos, especialmente na área dermatológica, onde o estrato córneo representa uma importante barreira à permeação de substâncias. Nesse contexto, a fibroína da seda destaca-se como um biopolímero natural devido à sua biocompatibilidade, biodegradabilidade e baixa toxicidade. Esse trabalho teve como objetivo otimizar a síntese de nanopartículas de fibroína da seda pelo método de dessolvatação em etanol, avaliando a influência da concentração do biopolímero e do congelamento nas propriedades coloidais das formulações. A fibroína foi obtida a partir de casulos de Bombyx mori, submetidos às etapas de degomagem, solubilização e diálise. A solução-mãe, com teor médio de sólidos de 5%, foi diluída para concentrações de 1% e 3% (m/v). As nanopartículas foram caracterizadas por Espalhamento Dinâmico de Luz e potencial zeta em pH 4,0. A formulação de 3% apresentou melhores resultados que a de 1%, com menor diâmetro hidrodinâmico e menor índice de polidispersão. O congelamento por 24 horas promoveu a otimização do sistema, reduzindo o diâmetro das nanopartículas para 116,5 nm e o índice de polidispersão para 0,270. Os resultados demonstram que a concentração de 3% associada ao congelamento representa a condição mais promissora para obtenção de nanopartículas homogêneas, com potencial aplicação como nanocarreadores para o encapsulamento e liberação de bioativos dermatológicos.

Palavras-chave: Nanotecnologia; fibroína da seda; nanopartículas; dessolvatação.

TITLE: Optimization of Silk Fibroin Nanoparticle Synthesis for Potential Nanoencapsulation Applications

Abstract

Nanotechnology holds great potential for the development of controlled delivery systems for bioactive compounds, particularly in the dermatological field, where the

stratum corneum represents a significant barrier to substance permeation. In this context, silk fibroin stands out as a natural biopolymer due to its biocompatibility, biodegradability, and low toxicity. This study aimed to optimize the synthesis of silk fibroin nanoparticles using the ethanol desolvation method by evaluating the influence of biopolymer concentration and freezing on the colloidal properties of the formulations. Fibroin was obtained from Bombyx mori cocoons and subjected to degumming, solubilization, and dialysis steps. The stock solution, with an average solid content of 5%, was diluted to concentrations of 1% and 3% (w/v). The nanoparticles were characterized by Dynamic Light Scattering and zeta potential measurements at pH 4.0. The 3% formulation showed better results than the 1% formulation, presenting a smaller hydrodynamic diameter and lower polydispersity index. Freezing for 24 hours further optimized the system, reducing the nanoparticle diameter to 116.5 nm and the polydispersity index to 0.270. The results demonstrate that the 3% concentration combined with freezing represents the most promising condition for obtaining homogeneous nanoparticles, with potential application as nanocarriers for the encapsulation and delivery of dermatological bioactive compounds.

Keywords: Nanotechnology; Silk fibroin; Nanoparticles; Desolvation.

Introdução

A nanotecnologia consolidou-se no final do século XX como uma área multidisciplinar promissora, fundamentada na capacidade técnica de manipular a matéria em dimensões atômicas e moleculares [1]. Nessa dimensão, os materiais exibem propriedades físico-químicas distintas dos seus tamanhos macroscópicos, como maior reatividade química e capacidade de transpor barreiras biológicas, o que impulsiona o desenvolvimento de sistemas de liberação controlada de fármacos e cosméticos [1,2]. Nessa perspectiva, a bionanotecnologia é um avanço crucial para a indústria farmacêutica, uma vez que cerca de 40% dos agentes terapêuticos disponíveis e 90% daqueles em fase de desenvolvimento apresentam baixa solubilidade aquosa, o que compromete sua biodisponibilidade [3]. Assim, moléculas com essas características apresentam baixa biodisponibilidade e eficácia clínica reduzida, exigindo nanocarreadores que protejam o ativo contra degradação e facilitem sua entrega no local de ação [2,4].

No contexto dermatológico, o maior desafio reside na transposição da barreira cutânea da pele. Essa camada mais externa, o estrato córneo, é composta por uma matriz densa de proteínas e lipídios insolúveis que impermeabiliza a epiderme, limitando severamente a permeação de substâncias hidrofílicas ou de elevado peso molecular [5]. Ativos anti-idade de alta performance, como o acetil hexapeptídeo-3 (Argireline®), que atua mimetizando a toxina botulínica para reduzir linhas de expressão, sofrem com essa limitação. Devido à sua natureza hidrofílica, o peptídeo tende a se aglomerar na superfície da pele, apresentando taxas de permeação para além do estrato córneo inferiores a 0,01% em formulações convencionais [2].

Para otimizar a entrega transdérmica, o uso de biopolímeros naturais como matrizes para nanopartículas têm demonstrado resultados promissores. Dentre esses materiais, a fibroína da seda (SF), extraída dos casulos do bicho-da-seda Bombyx mori, destaca-se por sua intrínseca biocompatibilidade, biodegradabilidade e baixa toxicidade em tecidos humanos [4,6]. A SF é quimicamente caracterizada como uma proteína anfifílica,

composta majoritariamente por blocos repetitivos dos aminoácidos Glicina (43-46%), Alanina (25-30%) e Serina (12%) [6]. Essa arquitetura molecular versátil facilita a adsorção e o carregamento de diversos bioativos através de interações hidrofóbicas, forças eletrostáticas e ligações de hidrogênio [2,6]. Além das propriedades biológicas, a fibroína possui uma notável capacidade de transição conformacional entre um estado amorfo/solúvel (Seda I) e uma estrutura cristalina organizada em folhas-β (Seda II) [7]. Este controle sobre a organização estrutural é um parâmetro fundamental para garantir a estabilidade coloidal e a integridade mecânica das nanopartículas, permitindo a regulação da taxa de degradação e a eficácia do sistema de liberação no tecido cutâneo [2].

Apesar do potencial da SF, a obtenção de nanossistemas com alta homogeneidade e tamanhos controlados exige a otimização rigorosa dos parâmetros de síntese. Assim, o presente trabalho tem como objetivo a otimização da síntese de nanopartículas de fibroína da seda produzidas pelo método de dessolvatação em etanol. A pesquisa investiga a influência da concentração do biopolímero e o efeito do congelamento na redução do diâmetro hidrodinâmico e na melhoria do Índice de Polidispersão (PdI), visando o desenvolvimento de um carreador nanoestruturado eficiente para o encapsulamento de bioativos dermatológicos.

Metodologia

1- Materiais e reagentes

Os materiais utilizados para a obtenção da matriz proteica foram casulos do bicho-da-seda Bombyx mori. Os reagentes químicos de grau analítico incluíram: carbonato de sódio (Na2CO3 PA 99%) para a etapa de degomagem; cloreto de cálcio (CaCl2 anidro puríssimo 96%) e etanol (CH3CH2OH PA 99,5%) para a composição da solução ternária de solubilização; e membranas de diálise de celulose (6-8 kD MWCO) para purificação. Para a síntese das nanopartículas, utilizou-se etanol como agente dessolvatante e água deionizada para diluições e lavagens.

2- Obtenção da solução de fibroína

2.1- Degomagem

Os casulos foram cortados e submetidos a tratamento em solução aquosa de Na2CO3 0,05 M a 70 °C. O processo foi realizado em ciclos de 30 minutos para garantir a remoção completa da sericina, seguido de lavagens exaustivas em água destilada para neutralização.

2.2- Solubilização

As fibras puras e secas foram dissolvidas utilizando o método de Ajisawa, empregando uma solução ternária (CaCl2: CH3CH2OH: H2O) na razão molar 1:2:8. Diferente de

protocolos convencionais de 4 horas, o processo foi otimizado para 1 hora sob agitação constante a 60 °C, visando minimizar a degradação térmica da cadeia polipeptídica.

2.3- Purificação via Diálise

A solução salina resultante foi acondicionada em membranas de celulose e submetida à diálise contra água deionizada por 72 horas. A água foi trocada em intervalos de 3 horas, com monitoramento constante da condutividade elétrica para assegurar a remoção total dos sais residuais.

3- Padronização e Preparo da Matriz

Após a purificação, a solução de fibroína foi centrifugada por 30 minutos a 4000 rpm. A concentração da solução foi determinada via análise gravimétrica. Alíquotas de 1 ml foram submetidas à secagem em estufa a 60 °C até peso constante, resultando em um teor de sólidos médio de 5%. Esta solução mãe foi subsequentemente diluída em água deionizada para obter as concentrações de trabalho de 1% e 3% (m/v). Abaixo, na figura 1, é possível ver, de forma simplificada, o esquema metodológico:

4- Síntese de Nanopartículas por Dessolvatação

A formação das nanopartículas ocorreu pelo método de dessolvatação em líquido miscível. Sob agitação magnética constante em temperatura ambiente, a solução de fibroína foi introduzida por gotejamento em etanol. Utilizou-se exclusivamente a razão fixa 80/20 v/v (solvente/polímero), mantendo-se a agitação até a transição visual de solução límpida para dispersão coloidal turva, sinalizando a formação das partículas. Após essa etapa, um grupo de amostras foram submetidas apenas à centrifugação a 4000 rpm por 30 minutos e banho ultrassônico por 30 minutos e outro grupo submetidas ao congelamento por 24 horas antes do processamento anterior , visando compreender o efeito do congelamento no sistema.

5- Técnicas de Caracterização Físico-Química

As análises foram conduzidas utilizando o equipamento Zetasizer Nano ZS. Todas as medições foram realizadas em pH 4,0, condição que mimetiza a acidez da pele e aproxima-se do ponto isoelétrico da proteína.

5.1- Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS):

Utilizado para determinar o diâmetro hidrodinâmico médio e o Índice de Polidispersão (PdI), através de 10 ciclos de leitura por amostra em cubetas de quartzo.

5.2- Potencial Zeta

A carga elétrica superficial e a estabilidade coloidal foram avaliadas via mobilidade eletroforética.

Resultados e Discussões

3.1. Eficiência do Processo de Extração e Solubilização Otimizada da Fibroína da Seda

Como descrito na seção anterior, após a lavagem e secagem das fibras degomadas, procedeu-se à solubilização utilizando a solução ternária (CaCl2: CH3CH2OH: H2O). Nessa lógica, aqui reside a primeira grande contribuição e otimização metodológica deste trabalho: os protocolos tradicionais descritos na literatura costumam recomendar tempos de exposição térmica de até 4 horas sob agitação mecânica. No entanto, neste estudo, o processo foi otimizado para apenas 1 hora a 60 °C. Essa redução representou uma importante otimização de processo na rotina laboratorial. Essa modificação metodológica permitiu simplificar as etapas preliminares de preparação da solução-mãe, garantindo a obtenção do teor de sólidos médio de 5% (m/v) de maneira muito mais rápida e eficiente. Além disso, a estratégia provou-se plenamente viável para a linha de desenvolvimento experimental, uma vez que a solução de fibroína resultante viabilizou a síntese posterior de nanopartículas estáveis, monodispersas e com excelentes parâmetros coloidais

3.2- Síntese de Nanopartículas via Dessolvatação: Influência da Concentração Polimérica

Para avaliar o impacto da concentração polimérica inicial na nucleação e crescimento das partículas, foram preparadas suspensões nas concentrações de 1% e 3% (m/v) de fibroína, mantendo-se o grupo de amostras controle sob centrifugação física e banho ultrassônico simples, sem nenhum tratamento térmico

Os dados de diâmetro hidrodinâmico médio e Índice de Polidispersão (PdI) obtidos por Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS) revelaram o comportamento inicial do sistema sem o efeito de congelamento, conforme sintetizado na Tabela 1:

Os dados demonstram que, no sistema puramente centrifugado (sem congelamento), a elevação da concentração polimérica de 1% para 3% provocou uma diminuição no diâmetro hidrodinâmico médio de 141,8 nm para 122,2 nm, acompanhada de uma leve melhoria no PdI de 0,415 para 0,370.

Esse comportamento pode ser interpretado pela dinâmica de nucleação do processo de nanoprecipitação. Em sistemas com maior concentração inicial de fibroína (3%), a supersaturação local gerada pela adição rápida do etanol ocorre de forma mais intensa, favorecendo uma alta taxa de nucleação primária em detrimento do crescimento das partículas. Isso resulta em um número significativamente maior de núcleos que consomem o biopolímero disponível de forma rápida, gerando nanopartículas com diâmetros ligeiramente menores e distribuição mais estreita do que no sistema mais diluído a 1% [8]. .

No entanto, ambos os sistemas coloidais de controle apresentaram valores de PdI elevados (superiores a 0,3), o que reflete sistemas polidispersos com moderada heterogeneidade de tamanho e distribuição indesejada de diâmetros para fins farmacêuticos.

3.3. O Efeito do congelamento no sistema

Para solucionar o problema da heterogeneidade e otimizar a estabilidade física do sistema, as formulações foram submetidas ao congelamento por 24 horas. Os resultados obtidos para as amostras submetidas a essa estabilização física foram satisfatórios, mostrando o congelamento como estratégia chave para a obtenção de nanocarreadores mais estáveis.

O impacto direto do congelamento nas propriedades coloidais da formulação a 3% está detalhado na tabela 2:

Com a aplicação do congelamento por 24 horas, o diâmetro hidrodinâmico médio das nanopartículas reduziu para 116,5 nm. Mais importante ainda, o Índice de Polidispersão sofreu uma queda drástica para 0,27. Na física de colóides e na nanotecnologia farmacêutica, um PdI abaixo de 0,300 é o limiar técnico que classifica uma dispersão como altamente monodispersa e homogênea, garantindo que as partículas possuam tamanhos perfeitamente padronizados e reprodutíveis [2].

Fisicamente, sugere-se que essa contração no diâmetro hidrodinâmico e o estreitamento da polidispersão decorram de uma provável reorganização das cadeias polipeptídicas induzida pelo estresse térmico. Embora análises estruturais diretas, como FTIR e DRX, não tenham sido realizadas para este lote de amostras, a literatura científica estabelece a hipótese de que o tratamento de congelamento lento favorece a transição conformacional da fibroína da seda para estruturas secundárias mais ordenadas e compactas, do tipo folhas-β (Seda II). Durante o congelamento, o confinamento físico gerado pelas frentes de crescimento dos cristais de gelo pode forçar a aproximação das cadeias poliméricas. Esse processo facilita a formação de interações hidrofóbicas e pontes de hidrogênio intercadeias, o que explicaria a compactação molecular e a obtenção de nanopartículas significativamente menores, mais estáveis e homogêneamente distribuídas. [2, 8].

3.3. Comportamento do Potencial Zeta e Estabilização Hidrofóbica em pH Ácido

As análises de carga superficial foram conduzidas sob pH controlado de 4,0, uma condição selecionada para mimetizar a acidez natural cutânea. Os dados obtidos, mostrados na tabela 2, revelaram valores de potencial Zeta de -5,7 mV para as amostras centrifugadas a 3% e de -10,4 mV para as amostras submetidas ao congelamento, indicando uma carga global líquida negativa de baixa magnitude.

Como o ponto isoelétrico (IEP) da fibroína da seda se situa em torno de pH 4,0, a carga líquida superficial da proteína nessa condição tende teoricamente à neutralidade. Sob repulsão eletrostática nula ou reduzida, dispersões coloidais convencionais tendem a perder a estabilidade física, sofrendo aglomeração e precipitação macroscópica espontânea. Contudo, as suspensões obtidas neste trabalho mantiveram-se visualmente homogêneas e estáveis na escala nanométrica. Para explicar essa estabilidade física em pH próximo ao ponto isoelétrico, a literatura científica propõe a hipótese de um mecanismo de estabilização governado por forças não eletrostáticas, especificamente interações hidrofóbicas. Quimicamente, a fibroína da seda é descrita como uma proteína anfifílica com uma abundância marcante de resíduos de aminoácidos apolares, compostos majoritariamente por Glicina (43-46%) e Alanina (25-30%) [2].

Nessa perpesctiva, sugere-se que, durante o processo de nanoprecipitação e auto-organização molecular, os blocos altamente hidrofóbicos de alanina e glicina tendam a se enovelar voltados para o interior da partícula, minimizando o contato com o solvente polar. Essas fortes forças atrativas de coesão interna no núcleo hidrofóbico das esferas atuariam como o principal pilar de sustentação física do nanossistema [4]. Dessa forma, hipotetiza-se que a estabilização das nanopartículas desenvolvidas em pH 4,0 ocorra predominantemente por via hidrofóbica, superando a fraca repulsão eletrostática interfacial evidenciada pelos baixos valores modulares do potencial Zeta.

Conclusão

O presente trabalho demonstrou a viabilidade da obtenção e otimização de nanopartículas de fibroína da seda por meio do método de dessolvatação em etanol, evidenciando a influência da concentração polimérica e do tratamento de congelamento sobre as propriedades físico-químicas e coloidais do sistema. Inicialmente, a otimização da etapa de solubilização da fibroína, realizada em apenas 1 hora a 60 °C, mostrou-se eficiente para a obtenção de uma solução-mãe com teor médio de sólidos de 5%, reduzindo significativamente o tempo de processamento em comparação aos protocolos convencionais e viabilizando a síntese posterior das nanopartículas. Além disso, a avaliação das concentrações de 1% e 3% de fibroína demonstrou que o aumento da concentração polimérica favoreceu a formação de partículas menores e com distribuição de tamanho mais homogênea. As nanopartículas obtidas a partir da solução de 3% apresentaram diâmetro hidrodinâmico de 122,2 nm e PdI de 0,370, enquanto a formulação de 1% apresentou partículas maiores, com 141,8 nm e PdI de 0,415. Entretanto, apesar da melhora observada com o aumento da concentração, ambas as formulações sem congelamento apresentaram valores de PdI superiores a 0,3, indicando uma distribuição de tamanho ainda heterogênea.

O congelamento por 24 horas mostrou-se a principal estratégia de otimização do sistema. Para a formulação contendo 3% de fibroína, esse tratamento reduziu o diâmetro hidrodinâmico médio para 116,5 nm e promoveu uma redução significativa do PdI para 0,270, indicando a obtenção de uma dispersão mais homogênea e com maior uniformidade de tamanho. Esses resultados sugerem que o congelamento pode favorecer a reorganização das cadeias polipeptídicas da fibroína e a compactação estrutural das nanopartículas. As análises de potencial zeta, realizadas em pH 4,0, apresentaram valores de baixa magnitude, , evidenciando a proximidade do sistema ao ponto isoelétrico da fibroína. Ainda assim, as suspensões mantiveram-se homogêneas, sugerindo que a estabilidade observada não depende exclusivamente da repulsão eletrostática, podendo estar associada predominantemente às interações hidrofóbicas e à organização estrutural da fibroína.

Dessa forma, os resultados obtidos confirmam que a combinação de uma concentração de fibroína de 3% com o congelamento por 24 horas representa a condição mais promissora dentre as formulações avaliadas, permitindo a obtenção de nanopartículas com diâmetro reduzido e distribuição de tamanho mais homogênea. Assim, o estudo estabelece uma base importante para o desenvolvimento de nanocarreadores de fibroína da seda voltados à aplicação dermatológica e ao futuro encapsulamento de bioativos. Como perspectivas futuras, recomenda-se a realização de análises estruturais, estudos de

estabilidade ao longo do tempo, avaliação da eficiência de encapsulamento e ensaios de liberação e permeação cutânea, visando aprofundar a compreensão do sistema e validar seu potencial para aplicações dermocosmético.

Referências

[1]- PYRRHO, Monique; SCHRAMM, Fermin Roland. A moralidade da nanotecnologia. Cadernos de Saúde Pública, v. 28, p. 2023-2033, 2012.

[2]- FREIRE, Aline Gabriel. Nanoencapsulamento do bioativo acetil hexapeptídeo com biopolímero têxtil para aplicação dermocosmética. 2019. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Têxtil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

[3]- LOFTSSON, Thorsteinn; BREWSTER, Marcus E. Pharmaceutical applications of cyclodextrins: basic science and product development. Journal of pharmacy and pharmacology, v. 62, n. 11, p. 1607-1621, 2010.

[4]- BAYRAKTAR, Oguz et al. Selective Encapsulation of the Polyphenols on Silk Fibroin Nanoparticles: Optimization Approaches. International Journal of Molecular Sciences, v. 24, n. 11, p. 9327, 2023.

[5]- BERNARDO, Ana Flávia Cunha; SANTOS, Kamila dos; SILVA, Débora Parreiras da. Pele: alterações anatômicas e fisiológicas do nascimento à maturidade. Revista Saúde em foco, v. 1, n. 11, p. 1221-1233, 2019.

[6]- FUSTER, M. G. et al. Improving anticancer therapy with naringenin-loaded silk fibroin nanoparticles. Nanomaterials, v. 10, n. 4, p. 718, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/nano10040718.

[7]- ASAKURA, T. Structure of Silk I (Bombyx mori Silk Fibroin before Spinning) - Type II β-Turn, Not α-Helix-. Molecules, v. 26, n. 12, p. 3706, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules26123706.

[8]- MARTÍNEZ RIVAS, Claudia Janeth et al. Nanoprecipitation process: From encapsulation to drug delivery. International Journal of Pharmaceutics, v. 532, n. 1, p. 66–81, 2017b.

Anexos



Figura 1- Esquema da obtenção da solução de fibroína



Tabela 1: Parâmetros coloidais comparativos das nanopartículas de fibroína da seda puras sem congelamento obtidos por DLS a 25 °C (pH 4,0)



Tabela 2: Efeito do congelamento por 24 horas sobre as nanopartículas de fibroína a 3% (m/v) (pH 4,0)

CÓDIGO: ET1105

AUTOR: JÚLIO DANILO SOARES DE SANTANA

ORIENTADOR: HELIO RODRIGUES DOS SANTOS

TÍTULO: DESEMPENHO DE BIOMASSA ANAMMOX FLOCULENTA EM REATOR SBR SOB TEMPERATURA CONTROLADA

Resumo

A remoção biológica de nitrogênio pelo processo Anammox apresenta potencial como alternativa sustentável ao tratamento convencional, devido ao menor consumo energético, à baixa demanda por carbono orgânico e à reduzida produção de lodo. Nesse contexto, a biomassa Anammox floculenta pode oferecer maior simplicidade operacional, especialmente em regiões tropicais. Este estudo avaliou o desempenho dessa biomassa em um reator de batelada sequencial (SBR) de 0,4 L, operado a 35 °C, sob condições anóxicas, durante 93 dias. O reator foi inoculado com biomassa previamente enriquecida e operado em duas fases, com diferentes tempos de detenção hidráulica e cargas nitrogenadas. A remoção média de nitrogênio amoniacal foi de aproximadamente 17%, enquanto a remoção de nitrogênio total foi limitada, indicando que o processo Anammox não se estabeleceu efetivamente durante o período experimental. Os resultados sugerem maior contribuição da nitrificação parcial para a conversão do nitrogênio. Apesar da baixa eficiência de remoção, o sistema apresentou estabilidade operacional e manutenção visual da biomassa. Os resultados contribuem para a compreensão do comportamento da biomassa Anammox floculenta em SBR sob temperatura tropical e fornecem subsídios para futuras pesquisas voltadas ao aprimoramento das condições operacionais do processo.

Palavras-chave: Anammox. Nitrogênio. Nitrificação parcial. Biomassa floculenta.

TITLE: Performance of Flocculent Anammox Biomass in an SBR under Controlled Temperature

Abstract

Biological nitrogen removal through the Anammox process has potential as a sustainable alternative to conventional treatment due to lower energy consumption,

reduced organic carbon demand, and lower sludge production. In this context, flocculent Anammox biomass may offer greater operational simplicity, particularly in tropical regions. This study evaluated the performance of this biomass in a 0.4 L sequencing batch reactor (SBR) operated at 35 °C under anoxic conditions for 93 days. The reactor was inoculated with previously enriched biomass and operated in two phases with different hydraulic retention times and applied nitrogen loads. The average ammonium nitrogen removal was approximately 17%, while total nitrogen removal was limited, indicating that the Anammox process was not effectively established during the experimental period. The results suggest a greater contribution of partial nitrification to nitrogen conversion. Despite the low removal efficiency, the system showed operational stability and visual maintenance of the biomass. These results contribute to understanding the behavior of flocculent Anammox biomass in SBRs under tropical temperatures and provide insights for future research aimed at improving the operational conditions of the Anammox process.

Keywords: Anammox. Nitrogen. Partial nitrification. Flocculent biomass.

Introdução

A remoção biológica de nitrogênio pelo processo Anammox apresenta potencial como alternativa sustentável ao tratamento convencional, devido ao menor consumo energético, à baixa demanda por carbono orgânico e à reduzida produção de lodo. Nesse contexto, a biomassa Anammox floculenta pode oferecer maior simplicidade operacional, especialmente em regiões tropicais. Este estudo avaliou o desempenho dessa biomassa em um reator de batelada sequencial (SBR) de 0,4 L, operado a 35 °C, sob condições anóxicas, durante 93 dias. O reator foi inoculado com biomassa previamente enriquecida e operado em duas fases, com diferentes tempos de detenção hidráulica e cargas nitrogenadas. A remoção média de nitrogênio amoniacal foi de aproximadamente 17%, enquanto a remoção de nitrogênio total foi limitada, indicando que o processo Anammox não se estabeleceu efetivamente durante o período experimental. Os resultados sugerem maior contribuição da nitrificação parcial para a conversão do nitrogênio. Apesar da baixa eficiência de remoção, o sistema apresentou estabilidade operacional e manutenção visual da biomassa. Os resultados contribuem para a compreensão do comportamento da biomassa Anammox floculenta em SBR sob temperatura tropical e fornecem subsídios para futuras pesquisas voltadas ao aprimoramento das condições operacionais do processo.

Metodologia

O estudo baseou-se na operação de um Reator em Batelada Sequencial (SBR) de 0,4 L, mantido a 35 °C e sob agitação contínua, utilizando biomassa Anammox floculenta. A operação durou 93 dias em ciclos diários de 24 horas e foi dividida em duas etapas experimentais. A Fase 1 (Adaptação), com duração de 37 dias, operou com Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) de 4 dias, Carga Nitrogenada Aplicada (CNA) de 0,25 kg

N/m³·d e renovação de 25% do volume do reator a cada ciclo. Já a Fase 2 (Desempenho), que durou 56 dias, teve o TDH reduzido para 2 dias e a CNA elevada para 0,49 kg N/m³·d, com a renovação do volume útil aumentada para 50%.

A alimentação do sistema foi realizada com um meio sintético estritamente anóxico, previamente desoxigenado com gás N_2, contendo concentrações padronizadas de 100 mg N/L de amônio e 100 mg N/L de nitrito. O monitoramento do reator ocorreu três vezes por semana, totalizando 32 amostragens, para aferir parâmetros físico-químicos (como pH, temperatura e alcalinidade) e quantificar as espécies nitrogenadas (amônio, nitrito, nitrato e nitrogênio total) por meio de métodos colorimétricos padronizados. Por fim, o desempenho geral foi avaliado calculando-se as eficiências de remoção e os coeficientes estequiométricos da reação, buscando confirmar a ocorrência da via metabólica autotrófica Anammox.

Resultados e Discussões

Os resultados operacionais do reator evidenciaram a manutenção da estabilidade física e físico-química do sistema ao longo dos 93 dias de experimento. A temperatura foi rigorosamente mantida em 35,0 ± 0,6 °C, demonstrando eficiência do sistema de aquecimento controlado. O pH apresentou uma média geral de 7,65 ± 0,44, com uma ligeira redução da Fase 1 (7,97 ± 0,48) para a Fase 2 (7,45 ± 0,28). Segundo a pesquisa, essa variação pode estar associada às alterações operacionais e às transformações biológicas do nitrogênio, que consomem alcalinidade, embora os valores tenham permanecido dentro da faixa ideal (6,7 a 8,3) para a atividade das bactérias Anammox, indicando que o pH não foi um fator limitante para o processo.

No que tange às eficiências de remoção, o desempenho do reator foi estatisticamente semelhante nas duas fases operacionais para o nitrogênio amoniacal, registrando médias de 16,7 ± 16,1% na Fase 1 e 17,3 ± 9,0% na Fase 2. Contudo, a redução do Tempo de Detenção Hidráulica e o aumento da carga nitrogenada na Fase 2 resultaram em uma queda expressiva no coeficiente de variação (de 96,4% para 52,0%), sugerindo uma adaptação gradual da biomassa às novas condições operacionais. Apesar dessa estabilização, a remoção de nitrogênio total (NT) permaneceu bastante reduzida durante todo o período, com uma eficiência média global de apenas 4,8 ± 8,5%, e diversos registros de valores próximos a zero ou negativos. O comportamento do nitrito também não indicou remoção eficiente, apresentando taxas médias negativas (-3,6 ± 11,5%), o que demonstra que a concentração do composto tendeu a permanecer estável ou até mesmo sofrer leve aumento durante a operação.

A avaliação das vias metabólicas por meio do balanço de massa e da estequiometria confirmou que a via autotrófica Anammox não se estabeleceu plenamente. Os coeficientes estequiométricos obtidos divergiram fortemente dos valores teóricos esperados para um processo Anammox ideal (que seriam de $\Delta NO_{2}^{-}/\Delta NH_{4}^{+}$ = 1,32 e $\Delta NO_{3}^{-}/\Delta NH_{4}^{+}$ = 0,26). Durante a Fase 2, a razão do consumo de nitrito pelo consumo de amônio permaneceu negativa (-0,43 ± 0,72), indicando a produção líquida de nitrito, enquanto a razão de produção de nitrato pelo consumo de amônio ficou próxima de zero (0,09 ± 0,15). Essa falta de

acoplamento estequiométrico sugere que o nitrogênio apenas transitou entre diferentes espécies químicas, sem remoção efetiva na forma de gás nitrogênio, e que o nitrito funcionou estritamente como um composto intermediário de rotas metabólicas paralelas.

As análises sugerem que as transformações observadas no reator foram, muito provavelmente, dominadas por processos concorrentes, como etapas incompletas de nitrificação e desnitrificação. Uma das hipóteses levantadas é que, mesmo com concentrações de oxigênio dissolvido no afluente abaixo de 0,5 mg/L, possíveis concentrações residuais no interior do reator podem ter favorecido a proliferação de bactérias oxidantes de amônia (AOB) em detrimento das bactérias Anammox. Na Fase 2, a taxa de remoção de amônia atingiu 0,09 kg $N/m^3 \cdot d$, um valor situado na faixa inferior típica de sistemas em fase de inicialização, corroborando a hipótese de que ocorreu conversão, mas associada à nitrificação parcial ao invés de atividade Anammox madura.

Por fim, ao comparar o desempenho do reator floculento estudado com outros sistemas descritos na literatura, os resultados foram marcadamente inferiores aos de reatores granulares e consolidados. O estudo atribui essa discrepância a fatores estruturais e operacionais, apontando que sistemas granulares, quando operados por períodos mais longos, desenvolvem maior estabilidade e melhor retenção da biomassa ativa. Embora os resultados evidenciem instabilidade e predominância de rotas metabólicas alternativas devido ao estágio inicial de desenvolvimento microbiano e ao curto tempo de operação, o estudo destaca a relevância de gerar parâmetros basilares sobre o uso de biomassa floculenta em climas tropicais. A ausência de análises microbiológicas diretas foi apontada como uma limitação, reforçando a necessidade de pesquisas futuras mais prolongadas para melhor compreender as rotas competitivas em SBRs floculentos.

Conclusão

As conclusões do estudo indicam que o reator avaliado apresentou eficiências inferiores àquelas tipicamente observadas em sistemas Anammox mais desenvolvidos. Essa diferença de desempenho é explicada no documento por divergências operacionais e estruturais em relação a outros estudos, destacando-se o tipo de biomassa utilizada (floculenta em oposição à granular), o tempo total de operação e o estágio de desenvolvimento da comunidade microbiana. O autor ressalta que sistemas granulares operados por períodos mais longos tendem a apresentar uma maior estabilidade e uma melhor retenção da biomassa ativa, fatores que favorecem significativamente o desempenho do processo Anammox.

Apesar dessas limitações nos resultados, a comparação realizada na pesquisa permite contextualizar o desempenho do reator como característico de uma fase inicial de desenvolvimento do sistema. Nessa etapa preliminar, é comum a ocorrência de instabilidade na conversão do nitrogênio e a predominância de rotas metabólicas concorrentes. O trabalho se destaca por fornecer parâmetros experimentais sobre o comportamento da biomassa floculenta em reatores SBR operados sob condições climáticas tropicais, o que contribui para ampliar a base de conhecimento disponível sobre esse tipo de configuração potencialmente mais simples e acessível.

Por fim, o documento reconhece que a ausência de análises microbiológicas diretas representou uma limitação ao estudo, pois restringiu uma interpretação mais aprofundada sobre a estrutura da comunidade microbiana responsável pelas transformações do nitrogênio observadas. Diante disso, os resultados reforçam a necessidade de que investigações futuras adotem tempos de operação mais extensos e integrem técnicas microbiológicas avançadas. Essa abordagem complementar é apontada como fundamental para aprofundar a compreensão sobre como ocorre o desenvolvimento e a estabilização do processo Anammox em sistemas baseados em biomassa floculenta.

Referências

APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. Am. J. Public Health, 2017. ARAÚJO, Juliana Calábria de et al. Enriquecimento de bactérias anaeróbias oxidadoras de amônia-anammox. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 15, n. 2, p. 205–212, 2010. BELTRAN, C. A. E. Aplicación de un sistema de control supervisor de pH y OD en la operación continua de un reactor nitrificante de disco rotatório. 2008. Trabajo académico. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile, 2008. CHAMCHOI, N.; NITISORAVUT, S. Anammox enrichment from different conventional sludges. Chemosphere, v. 66, n. 11, p. 2225–2232, 2007. CHINI, A. et al. Evaluation of deammonification reactor performance and microorganisms community during treatment of digestate from swine sludge CSTR biodigester. Journal of Environmental Management, v. 246, p. 19–26, 2019. CHINI, A.; BONASSA, G.; CANTÃO, M. E. Process performance and anammox community diversity in a deammonification reactor under progressive nitrogen loading rates for swine wastewater treatment. Bioresource Technology, v. 311, p. 123521, 2020. CHOI, D. et al. Innovative start-up strategies for single-stage deammonification with conventional activated sludge: Results of a pilot-scale demonstration. Bioresource Technology, v. 309, 123423, 2020. DRIESSEN, W.; HENDRICKX, T. Two decades of experience with the granular sludge-based ANAMMOX® process treating municipal and industrial effluents. Processes, v. 9, n. 7, p. 1207, 2021. ESKINAZI-SANT'ANNA, E. M. et al. Águas potiguares: oásis ameaçados. Limnologia: Gestão inadequada ameaça reservas de água do semiárido brasileiro, v. 39, n. 233, p. 68–71, dez. 2006. FUX, C. et al. Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitritation and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant. Journal of Biotechnology, v. 99, n. 3, p. 295–306, 2002. GAO, J. et al. Effect of aeration modes on nitrogen removal and N2O emission in the partial nitrification and denitrification process for landfill leachate treatment. Science of the Total Environment, v. 853, 158424, 2022. HELSEN, D. R.; HIRSCH, R. M. Kendall's tau and the Mann-Kendall test for trend. Environmetrics, v. 3, n. 2, p. 161–172, 1992. LAWAL, Bayo. Applied statistical methods in agriculture, health and life sciences. Springer, 2014. LIU, J. et al. An autotrophic nitrogen removal process: short-cut nitrification combined with ANAMMOX for treating diluted effluent from an UASB reactor fed by landfill leachate. Journal of Environmental Sciences, v. 22, n. 5, p. 777–783, 2010. LU, Y.-F. et al. Improvement of start-up and nitrogen removal of the anammox process in reactors inoculated with conventional activated sludge using biofilm carrier materials. Environmental Technology, v. 39, n. 1, p. 59–67, 2017. MA, Y. et al. Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous predenitrification plant. Water

Research, v. 43, p. 563–572, 2009. MATIAS B. VANOTTI; JOSÉ MARTINEZ; TAKAO FUJII; ARIEL A. SZÖGI; DAISUKE HIRA. Ammonia Removal Using Nitrification and Anammox in a Single Reactor. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2012. METCALF & EDDY. Wastewater engineering: treatment and reuse. Boston: McGrawHill, 2003. MULDER, A. et al. Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. FEMS Microbiology Ecology, v. 16, p. 177–184, 1995. PEREIRA, A. D. et al. Microbial communities in anammox reactors: a review. Environmental Technology Reviews, v. 6, n. 1, p. 74–93, 2017. SHAW, D. R.; TERADA, A.; SAIKALY, P. E. Future directions in microbial nitrogen cycling in wastewater treatment. Current Opinion in Biotechnology, v. 88, p. 103163, 2024. SMITH, Val H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem. Environmental Science and Pollution Research, v. 10, n. 2, p. 126–139, 2003. STROUS, M. et al. Missing lithotroph identified as new planctomycete. Nature, v. 400, n. 6743, p. 446–449, 1999. STROUS, M.; HEIJNEN, J. J.; KUENEN, J. G.; JETTEN, M. S. M. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 50, p. 589–596, 1998. TANG, B. et al. Strategies for efficient enrichment of anaerobic ammonia oxidizing bacteria in activated sludge. Journal of Environmental Sciences, 2024. VAN DE GRAAF, A. A. et al. Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor. Microbiology, v. 142, p. 2187–2196, 1996. VAN DER STAR, Wouter R. L. et al. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: Experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam. Water Research, v. 41, n. 18, p. 4149–4163, 2007. VENTURIN, Bruno. Tratamento do digestato oriundo da digestão anaeróbia de efluente da suinocultura em uma unidade piloto do reator nitrammox. 2022. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2022. VERMA, S. et al. Successful start-up of anammox process from activated sludge and anaerobic sludge in a sequencing batch reactor using an unconventional strategy. International Biodeterioration & Biodegradation, v. 156, 2021. VOLCKE, Eveline I. P. et al. Operation of a SHARON nitritation reactor: practical implications from a theoretical study. Water Science and Technology, v. 56, n. 6, p. 145–154, 2007. WANG, Q. et al. Selection of seeding strategy for fast start-up of Anammox process with low concentration of Anammox sludge inoculum. Bioresource Technology, v. 268, p. 638–647, 2018.

CÓDIGO: ET1127

AUTOR: YURE FILIPE PALÁ DE SOUSA DO NASCIMENTO

COAUTOR: JULIA MARIA COSTA DE LIMA

COAUTOR: LUÍS MÁVY ALCÂNTARA SILVA

ORIENTADOR: FRANCISCO CLAUDIVAN DA SILVA

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UM TECIDO ISOLANTE À BASE DE LÁTEX UTILIZANDO A FIBRA DE LÃ CANINA PARA APLICAÇÕES TÉRMICAS E ANTIBACTERIANAS

Resumo

No presente trabalho foram realizadas analises das propriedades físico-químicas da lã canina que está sendo descartada no ambiente sem aproveitamento. Incialmente as fibras foram pré-tratadas em solução de hidróxido de sódio (NaOH) para remoção de ceras, poeiras entre outros tipos de sujeiras presentes na sua superfície. Testes de densidade e Moisture Regain mostram que a fibra possui características semelhantes à lã de merino. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrou após uma superfície limpa e isenta de resíduos entre as escamas. As técnicas de análises térmicas utilizadas na caracterização das amostras foram TG, DTA e DSC. Através da difração de raios-X (DRX) observa se que houve um pequeno aumento do pico na faixa 2q de 16,8 a 23,2. A análise da espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) houve uma diferença entre as amostras da fibra 1600 cm-1. Ambas as amostras in natura e tratada mostraram que houve inicialmente uma perda de massa a uma temperatura de até 200ºC devido à umidade contida na fibra já que a higroscopicidade é uma características da fibra proteica, e com a elevação também observamos os resíduos finais do material após 700º C.

Palavras-chave: lã canina, fibras proteicas, caracterização e sustentabilidade.

TITLE: DEVELOPMENT OF A LATEX-BASED INSULATING FABRIC USING CANINE WOOL FIBER FOR THERMAL AND ANTIBACTERIAL APPLICATIONS

Abstract

The present study investigated the physicochemical properties of canine wool, which is currently being discarded into the environment without any form of utilization. Initially, the fibers were pretreated with a sodium hydroxide (NaOH) solution to remove waxes,

dust, and other types of impurities present on their surface. Density and Moisture Regain tests showed that the fiber exhibits characteristics similar to those of merino wool. Scanning electron microscopy (SEM) revealed a clean surface, free of residues between the scales, after treatment. The thermal analysis techniques used to characterize the samples were thermogravimetry (TG), differential thermal analysis (DTA), and differential scanning calorimetry (DSC). X-ray diffraction (XRD) analysis showed a slight increase in the peak intensity in the 2θ range from 16.8° to 23.2°. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis revealed a difference between the untreated and treated fiber samples at 1600 cm^{-1}. Both the untreated and treated samples initially exhibited mass loss at temperatures up to 200 °C due to the moisture contained in the fiber, since hygroscopicity is a characteristic of protein fibers. As the temperature increased, the final residues of the material were also observed after 700 °C.

Keywords: canine wool; latex; thermal insulation; antibacterial activity.

Introdução

A sustentabilidade tem sido cada dia mais um tema em evidência no mundo, atualmente organizações têm buscado estar cada vez mais dentro desta filosofia em seus processos, seja produtos ou serviços. Novos materiais tem sido alvo de pesquisas e investimentos para uma substituição de produtos derivados de petróleo. O uso de fibras naturais na fabricação de novos materiais compósitos já está sendo utilizados em diversos campos de engenharia. Isto tem incentivado pesquisas científicas e tecnológicas em fibras naturais tradicionais, como o sisal, juta, entre outras, que apresentam características promissoras. Apesar da diversidade, alguns destes materiais ainda são relegados quanto ao seu potencial econômico, social e ambiental, tornando-os conveniente para aplicações práticas2. Nisto encontramos as fibras proteicas que podem ser usadas amplamente como material têxtil de alta qualidade. A lã é uma fibra conhecida pela sua boa capacidade de isolamento térmico, esta é uma característica de toda fibra proteica. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta a lã canina como uma nova opção de fibra em potencial para utilização destes materiais e que está sendo descartada sem aproveitamento causando poluição ambiental. As fibras são coletadas nos pet shops da região metropolitana da cidade de Natal sem custo algum.

Com o tratamento em solução alcalina de hidróxido de sódio para a remoção de impurezas presentes na superfície da fibra deixando as aptas para uma boa utilização. Com o estudo das análises térmicas, temos uma melhor compreensão da estabilidade térmica da fibra. Obtendo neste,

Metodologia

1. EXPERIMENTAL

2.1. Obtenção da fibra

A fibra de lã canina foi obtida gratuitamente nos pet shops da cidade de Natal e região. Primeiramente houve uma seleção das fibras almejando uma maior uniformidade de cor, tamanho, em seguida foi realizado um tratamento como uma solução de Hidróxido de Sódio a 0,05 mols para a remoção das impurezas tais como ceras entre sujidades.

2.2. Analises de MEV

As fibras foram analisadas em duas situações, na forma in natura e após tratamento. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada utilizando o modelo de bancada – TM 3000 HITACHI, a 15 kv, não sendo necessária a metalização das amostras.

2.3. Analises térmica

As análises Termogravimétrica e Térmica Diferencial (TG/DTA) foram realizadas no modelo DTG-60H com fluxo de 10ºC/min em atmosfera de nitrogênio. A Calorimetria exploratória diferencial (DSC) foi realizada no modelo DSC-60ª com fluxo também de 10ºC/min do gás nitrogênio durante as análises.

2.4. Moisture Regain e densidade

Foram realizados para verificar a densidade da fibra utilizando densímetro digital GEHAKA DSL 910. Também o Moisture Regain foi obtido pelo termo higrômetro digital modelo 303c.

2.5. Difração de raios-X

As fibras foram caracterizadas por difração de raios-X, operando com 40 kV, 30 mA e radiação Cu Kα no Difratômetro Universal de modelo Shimadzu DR 6000. Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente com ângulos 2θ entre 5 e 40º com 0,02º.

Resultados e Discussões

Na figura 3 se observa na análise da TG que houve inicialmente uma perda de massa de 7% que ocorre no intervalo de 25 a 210ºC decorrente da eliminação da água absorvida pela fibra do ambiente. Podemos observar também que entre 210 a 700ºC observa-se uma perda de massa de 88,4% associada à combustão do carbono e da liberação de substancias voláteis presentes na fibra obtendo dessa forma a degradação total do material. Da analise da DTA, a mesma apresenta dois picos exotérmicos, o primeiro em torno de 400ºC estando este associado diretamente à queima do carbono. Observa se um segundo pico exotérmico a 700ºC que está provavelmente associado ao inicio da cristalinização das cinzas residuais do material.

De acordo com os resultados, observa se ao longo de toda extensão do gráfico que a amostra da fibra tratada (NaOH) obteve alguns pontos com maior absorção quando comparadas com a amostra in natura. Ambas possuem bandas largas nos intervalos

entre 3550-3010 cm-1 está o singelo representando a estrutura de NH2 do grupo amida secundária. Podemos também observar no ponto 3334 cm-1 a presença do grupo O-H um ombro em 3023 cm-1 as bandas próximas a 3300 cm-1 têm sido associadas com as regiões que caracterizam a estrutura α-hélice da proteína secundária.

Densidade absoluta ou massa específica de uma substância qualquer é a razão entre a massa de um corpo pelo volume que o mesmo ocupa. Testes de densidade e acordo com a norma técnica ASTM D792 também foram realizados para verificar a densidade da fibra usando o densímetro digital. Com o resultado dos testes observou-se que a densidade média da lã canina é de 0,9804 g/cm3.

O Regain foi realizado na fibra tratada e in natura, obtivemos uma média de 11,46% na fibra tratada uma media de 11,94%.

dados como o limite máximo de temperatura que a fibra apresenta para uma futura aplicação em materiais compósitos. Este trabalho teve como objetivo avaliar estas fibras quantos as suas propriedades térmicas visando um aproveitamento melhor deste material em campos alternativos, gerando renda e atividade com produtos artesanais.

A figura 1 mostra ao longo de toda superfície da fibra a presença de resíduos tais como ceras, gorduras e outras substâncias minerais isto faz com que as escamas fiquem totalmente fechadas, isto se dá devido ao seu processo de formação da própria fibra e também ao ambiente em que o animal se encontra. Na figura 2, após o tratamento em solução de hidróxido de sódio (0,05mol) a temperatura ambiente de 25ºC, pode se observar que a superfície da fibra ficou isenta de resíduos, mais brilhosa e com as escamas mais abertas.

Da figura 4 na TG da fibra tratada, é observada que na mesma faixa de temperatura de 30 e 210ºC houve uma maior retirada de massa de água absorvida que foi de 10,46% que da figura 3. Podendo este ser resultante da retirada do material natural superficial pelo banho da solução. Entre 210 e 700ºC houve uma perda relativamente menor de massa de 86,84% que está associada à combustão do carbono e a retirada das substancias voláteis presentes na superfície da fibra. Na DTA se observa que houve um aumento no deslocamento do segundo pico exotérmico sendo este superior a 850ºC que este também está associado à cristalinização dos resíduos das cinzas semelhante à primeira análise.

Analisando a figura 5 podemos observar que na curva da fibra in natura o pico exotérmico também é evidenciado na curva DSC a 278ºC, talvez associado à quebra da estrutura molecular de algum componente da fibra. Já na figura 6 a curvas de DSC demonstra um pequeno pico endotérmico na curva referente à fibra tratada, possivelmente associada a uma transformação ocorrida em algum outro componente da fibra tais como a quebra da ligação de enxofre. O pico endotérmico pode está correspondente à liquefação da região cristalina4.

Através da difração de raios-X, pode se observar que houve um pequeno aumento no índice de cristalinidade da fibra tratada com relação a in natura, na faixa após o tratamento da fibra com NaOH visto que a hidrólise ácida tende a remover a porção amorfa das fibrilas não acessadas pelo tratamento alcalino. Mostra uma típica difração

das ligações alfa queratinas com picos na faixa 2q de 19 a 21º, e um pico menor entre 9 e 10º correspondendo a estrutura polimérica.

Conclusão

1- A micrografia mostrou uma remoção eficiente das impurezas na superfície da fibra sem alterar suas características físico-geométricas, proporcionando assim um melhor uso para uma futura confecção de materiais compósitos.

2- Comparando as curvas TG, DTA e DSC das fibras tratadas e in natura, se observa que existe uma boa similaridade entre as mesmas, o que induz a se concluir que o tratamento térmico não afetou a fibra no que diz respeito ao seu comportamento. No entanto se observa pela TG que a degradação total da fibra in natura dá-se a uma temperatura menor se comparado ao da fibra tratada. Além disso, as curvas DTA e DSC da fibra tratada apresenta menos variância que as curvas DTA e DSC da fibra in natura. Portanto podemos concluir que a fibra tratada apresenta maior estabilidade térmica que a fibra in natura, onde a menor estabilidade térmica da fibra in natura pode estar associada ao agregado superficial de material oleoso na mesma.

Referências

1. SILVA, C. J.S.M. et al. Treatment of fibres with subtilisin and subtilisin-PEG. Enzyme and Microbial Tecnology 36 p. 917-922 (2005).

2. Ramakrishna M, Kumar V, Negi SY. Recent development in natural fiber reinforced polypropylene. J Reinf Plast Comp 2009;28(10):1169–89.

3. LADCHUMANANANDASIVAM, R. Ciências dos polímeros e engenharia de fibras I. 2005,39p Apostila de curso. Natal, RN: UFRN, 2005.

4. Xu, W.; Guo, W.; Li, W.; Thermal Analysis of Ultrafine Wool Powder. Wuhan Institute of Science and Tecnology, China 2002.

5. FELIPE, Renata Carla T. S.; Materiais Compósitos, Natal, 2008, Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA6t0AH/apostila-compositos>. Acesso em 12 jun. 2012

6. MOTHÉ, C.G; AZEVEDO, A. D. Análise térmica de Materiais. IEditora, São Paulo, 300p (2002).

7. Elvira, M. G; DE QUÉ ESTÁ HECHA LA LANA Y PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TEXTILES – 2009, http://www.produccion-animal.com.ar. Acessado em: 02 jun. 2012

8. Renke Dullart et al (2012). Keratin fibers from chicken feathers: Structure and advances in polymer composites. Cap. 7 Nova Science Publeshers Inc.

9. MOTHÉ, C. G.; ARAÚJO, C. R. Caracterização Térmica e Mecânica de Compósitos de Poliuretano com Fibras de Curauá. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Vol. 14, nº4, p. 274-278, Rio de Janeiro (2004).

10. CALLISTER, W. D. Jr. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

Anexos



FIGURA 1 E FIGURA 2



FIGURA 3



FIGURA 4



FIGURA 5 E 6



FIGURA 7

CÓDIGO: ET1148

AUTOR: ANANDA DANTAS FORTUNATO

ORIENTADOR: ANGELO RONCALLI OLIVEIRA GUERRA

TÍTULO: Desenvolvimento de Mecanismos de Automação e Controle para Aumento da Autonomia de Pacientes com ELA

Resumo

A Esclerose Lateral Amiotrófica (ELA) é uma doença neurodegenerativa progressiva caracterizada pelo comprometimento dos neurônios motores e pela perda gradual da capacidade de movimentação voluntária. A progressão das limitações motoras pode dificultar o uso de dispositivos convencionais de mobilidade, justificando o desenvolvimento de tecnologias assistivas capazes de reduzir a dependência de comandos manuais contínuos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação funcional preliminar de subsistemas robóticos associados a uma plataforma assistiva destinada à mobilidade de usuários de cadeiras de rodas. O desenvolvimento foi conduzido em duas frentes complementares. A primeira compreendeu a construção de um protótipo robótico em escala reduzida, equipado com microcontroladores Arduino Uno R4 WiFi e ESP32, motores de corrente contínua, acionamento por Ponte H, joystick analógico e sensores infravermelhos para futura navegação automática por seguimento de linha. A segunda envolveu o desenvolvimento e os testes de um mecanismo eletromecânico em escala real, constituído por estrutura mecânica, bateria, Arduino Uno R4 WiFi, microstep driver e motores de passo empregados nos movimentos de elevação e expansão da plataforma.

Palavras-chave: tecnologia assistiva; robótica móvel; cadeira de rodas; ELA

TITLE: Development and Preliminary Validation of Robotic Subsystems for an Assistive Mobility Platform Designed for People with Amyotrophic Lateral Sclerosis (Phase 1)

Abstract

Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) is a progressive neurodegenerative disease characterized by motor neuron degeneration and gradual loss of voluntary motor function. Disease progression may compromise the operation of conventional mobility devices, motivating the development of assistive technologies capable of reducing dependence on continuous manual control. This study presents the development and preliminary functional validation of robotic subsystems associated with an assistive mobility platform intended for wheelchair users. The work was conducted through two

complementary development stages. The first consisted of a reduced-scale mobile robotic prototype equipped with Arduino Uno R4 WiFi and ESP32 microcontrollers, DC motors, an Hbridge driver, an analog joystick and infrared sensors intended for future autonomous line-following navigation. The second stage involved the development and testing of a full-scale electromechanical mechanism comprising a mechanical structure, battery, Arduino Uno R4 WiFi, microstep driver and stepper motors used for platform lifting and lateral expansion. Functional tests demonstrated adequate manual control of the mobile prototype, successful discrimination between light and dark surfaces by the infrared sensors, and functional operation of the lifting mechanism. The lateral expansion mechanism also operated, although lower actuation speeds and further mechanical adjustments were required to reduce occasional jamming.

Keywords: assistive technology; mobile robotics; wheelchair; ALS

Introdução

A Esclerose Lateral Amiotrófica (ELA) é uma doença neurodegenerativa progressiva que afeta predominantemente os sistemas motores superior e inferior, provocando perda progressiva de força muscular e comprometimento funcional. A evolução clínica apresenta variabilidade entre indivíduos, mas pode incluir comprometimento dos membros superiores e inferiores, fala, deglutição e função respiratória. À medida que a doença progride, a preservação da mobilidade e da capacidade de interação com o ambiente passa a representar importante desafio para o paciente, seus familiares e cuidadores (BROWN; AL-CHALABI, 2017; MASRORI; VAN DAMME, 2020).
Nesse contexto, a tecnologia assistiva possui papel relevante na manutenção ou ampliação da funcionalidade e da independência de pessoas com limitações funcionais. A Organização Mundial da Saúde e o Fundo das Nações Unidas para a Infância destacam que produtos assistivos, entre eles cadeiras de rodas e sistemas relacionados à mobilidade, podem favorecer participação social, segurança e independência, além de reduzir parte da demanda imposta aos cuidadores (WHO; UNICEF, 2022).
No caso específico da ELA, dispositivos adaptativos tornam-se progressivamente relevantes em função da evolução das limitações motoras. A seleção de cadeiras de rodas motorizadas para pessoas com ELA constitui um processo que deve considerar necessidades presentes e futuras, características ambientais e mudanças funcionais decorrentes da progressão da doença (VANCE et al., 2023).
A incorporação de conceitos de robótica móvel às cadeiras de rodas permitiu o surgimento das chamadas smart wheelchairs. Nesses sistemas, computadores, sensores e algoritmos de controle complementam ou substituem parcialmente o comando manual tradicional, possibilitando diferentes níveis de assistência, desde prevenção de colisões e auxílio direcional até navegação semiautônoma ou autônoma (SIMPSON, 2005; LEAMAN; LA, 2017). Revisões mais recentes também destacam a integração crescente entre instrumentação eletrônica, estratégias de controle e interfaces alternativas para ampliar a autonomia na mobilidade (CALLEJAS-CUERVO; GONZÁLEZ-CELY; BASTOS-FILHO, 2020).
Dentro desse contexto foi concebida uma plataforma móvel assistiva destinada a receber cadeiras de rodas manuais e fornecer recursos complementares de mobilidade e suporte. A concepção tecnológica busca preservar a estrutura original da cadeira de rodas e concentrar na plataforma os elementos de motorização, controle e suporte. A arquitetura

mecânica prevê uma base móvel, rodas de tração, elementos de apoio e mecanismos 3 destinados ao posicionamento e estabilização da cadeira, permitindo o desenvolvimento progressivo de funções assistivas.

A presente etapa da pesquisa concentrou-se no desenvolvimento de subsistemas relacionados à robótica móvel, ao controle eletrônico e à movimentação eletromecânica da estrutura. Para reduzir os riscos de integração direta ao equipamento em escala real, parte da arquitetura eletrônica e computacional foi inicialmente implementada em um protótipo móvel de pequenas dimensões. Paralelamente, os mecanismos de movimentação da plataforma foram desenvolvidos e testados em escala real. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e realizar uma validação funcional preliminar de subsistemas robóticos e eletromecânicos para uma plataforma assistiva de mobilidade, contemplando o controle diferencial de um protótipo móvel, o sensoriamento infravermelho para navegação por seguimento de linha e o acionamento dos mecanismos de elevação e expansão da plataforma em escala real.

Metodologia

Caracterização da pesquisa

O estudo foi conduzido como pesquisa tecnológica aplicada, de caráter experimental e exploratório, direcionada ao desenvolvimento de uma prova de conceito em tecnologia assistiva. Considerando o estágio de maturidade tecnológica do sistema e a ausência, nesta fase, de instrumentação específica para caracterização dinâmica completa, adotou-se como critério principal a validação funcional dos subsistemas. Assim, buscou-se determinar se cada conjunto desenvolvido executava corretamente sua função básica antes da integração definitiva em um único equipamento. A estratégia de desenvolvimento foi dividida em duas escalas: um protótipo robótico em escala reduzida, utilizado para desenvolvimento e teste da arquitetura de controle e sensoriamento, e uma plataforma mecânica em escala real, utilizada para desenvolvimento e avaliação dos mecanismos eletromecânicos de movimentação. Essa abordagem permitiu testar inicialmente componentes eletrônicos e rotinas computacionais em uma estrutura de menor complexidade antes de sua aplicação integral ao sistema real.

Concepção da plataforma assistiva

A plataforma utilizada como base para o desenvolvimento integra uma linha de pesquisa voltada à obtenção de uma estrutura móvel capaz de receber uma cadeira de rodas e oferecer recursos adicionais de mobilidade. O conceito foi inicialmente desenvolvido por 4 modelagem tridimensional em ambiente CAD, permitindo avaliar a disposição estrutural, a posição das rodas, o mecanismo central e a distribuição dos principais componentes antes da fabricação do protótipo físico.

A modelagem virtual foi posteriormente sucedida pela fabricação da estrutura real, permitindo avaliar fisicamente os mecanismos concebidos. Essa transição é relevante em sistemas eletromecânicos, pois interferências geométricas, folgas, alinhamentos, atritos e condições de carregamento podem produzir comportamentos diferentes daqueles antecipados exclusivamente no modelo computacional.

Componentes e arquitetura experimental

Os principais componentes utilizados nas etapas de desenvolvimento são apresentados na Tabela 1. A seleção corresponde aos dispositivos efetivamente registrados nos ensaios e na documentação do protótipo.
Arduino Uno R4 WiFi > Protótipo reduzido e plataforma real > Processamento da lógica de controle e acionamento dos sistemas.
ESP32 > Protótipo reduzido > Aquisição dos comandos do joystick e comunicação nas etapas de controle.
Joystick HW-504 > Protótipo reduzido > Comando manual bidimensional.
Sensores infravermelhos HW-870 > Protótipo reduzido > Diferenciação entre superfície clara e linha escura para navegação por seguimento de linha.
Ponte H > Protótipo reduzido > Controle de sentido e velocidade dos dois motores DC.
Dois motores DC > Protótipo reduzido > Tração diferencial do carrinho de ensaio.
Motor de passo > Plataforma real > Acionamento dos mecanismos de elevação e expansão.
Microstep driver TB6600 > Plataforma real > Geração e condicionamento dos sinais de potência para o motor de passo.
Bateria > Plataforma real > Fornecimento de energia ao conjunto eletromecânico.
Botões e fins de curso > Plataforma real > Comando e interrupção dos movimentos durante os testes.

Protótipo robótico em escala reduzida

Foi construído um protótipo móvel em escala reduzida destinado aos testes preliminares dos sistemas de controle e sensoriamento. O conjunto recebeu dois motores DC acionados por Ponte H, microcontroladores Arduino Uno R4 WiFi e ESP32, joystick analógico e sensores infravermelhos. O protótipo foi utilizado para validar ligações elétricas, resposta dos motores, aquisição dos comandos e leitura dos sensores antes da integração ao equipamento em escala real.

Controle diferencial por joystick

O deslocamento do protótipo foi implementado por controle diferencial de duas rodas motrizes independentes. Os valores analógicos provenientes dos dois eixos do joystick foram convertidos em comandos associados ao movimento longitudinal e à mudança de direção. A combinação desses sinais modifica, de forma independente, os comandos aplicados às rodas esquerda e direita.

$$VE = FY + FX$$
$$VD = FY - FX$$

Nessas relações, VE e VD representam, respectivamente, os comandos destinados às rodas esquerda e direita, enquanto FY e FX representam as contribuições associadas aos eixos longitudinal e transversal do comando manual. A implementação empregou limitação dos sinais à faixa utilizada pelo PWM e região de zona morta próxima à posição central do joystick, reduzindo acionamentos involuntários decorrentes de pequenas oscilações do sinal.

Sensoriamento para seguimento de linha

Como estratégia inicial para desenvolvimento da navegação automática em ambiente controlado, foram utilizados sensores infravermelhos HW-870. O princípio empregado baseou-se na diferenciação da refletância entre uma superfície clara e uma linha escura. Cada sensor fornece um sinal digital que pode ser interpretado pelo microcontrolador e empregado na definição da correção de trajetória. Os sensores foram inicialmente avaliados individualmente, antes da utilização do sistema completo em malha fechada.

Essa decisão permitiu verificar o funcionamento dos 7 componentes e das conexões elétricas independentemente da lógica de acionamento dos motores. O algoritmo desenvolvido prevê a combinação das leituras dos sensores esquerdo e direito para selecionar entre manutenção do movimento retilíneo, correção para a esquerda, correção para a direita ou interrupção do movimento em uma condição não reconhecida ou potencialmente insegura. No período considerado neste trabalho, a validação experimental completa do seguimento autônomo de linha ainda não havia sido concluída.

Resultados e Discussões

Validação funcional do protótipo móvel

A construção do protótipo em escala reduzida possibilitou validar a arquitetura básica necessária à movimentação diferencial antes da implementação integral no equipamento em escala real. Durante os testes do controle manual, os motores responderam aos sinais provenientes do joystick, permitindo comandos de avanço, recuo e mudança de direção. A 9 resposta observada foi suficiente para confirmar o funcionamento das ligações, da Ponte H e da lógica de comando empregada nesta fase do desenvolvimento. A utilização de um protótipo reduzido mostrou-se adequada à estratégia de desenvolvimento, pois permitiu modificar códigos, conexões e parâmetros de controle sem submeter diretamente a estrutura real às sucessivas alterações típicas das fases iniciais de prototipagem. O emprego de tração diferencial também é coerente com arquiteturas utilizadas em sistemas robóticos móveis e cadeiras de rodas inteligentes, nas quais a diferença de velocidade entre os lados do veículo pode ser utilizada para realizar mudanças de direção (SIMPSON, 2005; LEAMAN; LA, 2017).

Funcionamento do mecanismo de elevação

Os ensaios realizados na plataforma em escala real demonstraram que o mecanismo de elevação pôde ser acionado pelo conjunto formado por Arduino, microstep driver e motor de passo. O motor responsável pelo movimento vertical produziu a elevação da estrutura central conforme o comando estabelecido, respondendo aos comandos de movimentação e interrupção utilizados durante os testes. A comparação visual entre as condições apresentadas na Figura 4 evidencia a alteração geométrica da plataforma provocada pelo mecanismo. Esse resultado constitui evidência funcional da transição entre a concepção virtual e uma estrutura mecânica operacional. Em etapa futura, a caracterização deverá relacionar número de passos, deslocamento linear, carga aplicada, velocidade, repetibilidade e consumo energético.

Conclusão

Foi possível desenvolver e realizar uma validação funcional preliminar de diferentes subsistemas associados a uma plataforma robótica assistiva. O protótipo em escala reduzida permitiu implementar o controle diferencial dos motores e validar o comando manual por joystick. Os sensores infravermelhos empregados na estratégia de seguimento de linha apresentaram resposta adequada na diferenciação das superfícies testadas, embora a navegação automática completa ainda demande integração e validação experimental. 12 Na plataforma em escala real, o conjunto formado por Arduino, bateria, microstep driver e motores de passo possibilitou o acionamento dos

mecanismos eletromecânicos. O sistema de elevação apresentou funcionamento compatível com a função prevista no projeto. O mecanismo de expansão lateral também operou, porém evidenciou maior sensibilidade à velocidade de acionamento e apresentou emperramentos ocasionais, indicando a necessidade de aperfeiçoamentos mecânicos e ajustes nos parâmetros de controle. Os resultados obtidos não permitem ainda afirmar eficácia clínica, autonomia completa, robustez ou desempenho quantitativo da plataforma, mas demonstram a viabilidade funcional dos princípios de atuação e controle avaliados. A principal contribuição desta etapa foi estabelecer uma sequência de desenvolvimento que integrou modelagem tridimensional, prototipagem robótica em escala reduzida, desenvolvimento eletrônico, programação e avaliação de mecanismos em escala real. Como continuidade, recomenda-se realizar ensaios quantitativos de velocidade, deslocamento, carga, repetibilidade, consumo energético e confiabilidade, além de concluir a integração dos sensores à navegação automática e incorporar sistemas de detecção de obstáculos. Após a consolidação tecnológica e a análise dos requisitos de segurança, poderão ser planejadas etapas posteriores de avaliação da interação do equipamento com usuários.

Referências

BROWN, Robert H.; AL-CHALABI, Ammar. Amyotrophic lateral sclerosis. New England Journal of Medicine, v. 377, n. 2, p. 162-172, 2017. DOI: 10.1056/NEJMra1603471. CALLEJAS-CUERVO, Mauro; GONZÁLEZ-CELY, Aura Ximena; BASTOS-FILHO, Teodiano. Control systems and electronic instrumentation applied to autonomy in wheelchair mobility: the state of the art. Sensors, v. 20, n. 21, art. 6326, 2020. DOI: 10.3390/s20216326. LEAMAN, Jesse; LA, Hung Manh. A comprehensive review of smart wheelchairs: past, present, and future. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, v. 47, n. 4, p. 486-499, 2017. DOI: 10.1109/THMS.2017.2706727. MASRORI, P.; VAN DAMME, P. Amyotrophic lateral sclerosis: a clinical review. European Journal of Neurology, v. 27, n. 10, p. 1918-1929, 2020. DOI: 10.1111/ene.14393. SIMPSON, Richard C. Smart wheelchairs: a literature review. Journal of Rehabilitation Research and Development, v. 42, n. 4, p. 423-436, 2005. DOI: 10.1682/JRRD.2004.08.0101. VANCE, Daniel et al. Creating a consumer-friendly resource to assist persons with Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) in navigating the power wheelchair selection process. Assistive Technology, v. 35, n. 1, p. 35-40, 2023. DOI: 10.1080/10400435.2021.1915899. WORLD HEALTH ORGANIZATION; UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND. Global report on assistive technology. Geneva: World Health Organization; UNICEF, 2022. 140 p. ISBN 978-92-4-004945-1.

CÓDIGO: ET1170

AUTOR: LIA RAIANE LIMA DA SILVA

ORIENTADOR: FERNANDA CRISTINA BARBOSA PEREIRA QUEIROZ

TÍTULO: Mapeamento e Análise dos MOOCs nas Instituições Públicas de Ensino Superior

Resumo

A expansão dos Massive Open Online Courses (MOOCs) ampliou as possibilidades de acesso à formação online, porém a oferta desses cursos encontra-se distribuída entre diferentes plataformas e instituições, dificultando sua localização. Este trabalho teve como objetivo mapear MOOCs disponibilizados por instituições públicas de ensino superior brasileiras e desenvolver uma ferramenta digital para centralizar e facilitar o acesso a essas ofertas. Foi realizada pesquisa exploratória para identificação das instituições e cursos, seguida da organização e padronização dos dados, utilizando as áreas gerais da Classificação Internacional Normalizada da Educação adaptada para o Brasil (Cine Brasil). Foram identificados e catalogados 981 MOOCs, distribuídos entre 14 instituições, considerando informações como instituição, plataforma, área do conhecimento, carga horária, certificação e endereço eletrônico. A partir da base, foi desenvolvido o Portal Brasileiro de MOOCs, que reúne mecanismos de pesquisa, navegação por instituições e áreas do conhecimento, sistema de favoritos e acesso direto às páginas oficiais dos cursos. Os resultados evidenciam a diversidade da oferta e a concentração dos cursos em determinadas áreas do conhecimento, além de demonstrar o potencial de uma ferramenta centralizadora para facilitar a localização dessas oportunidades educacionais.

Palavras-chave: MOOCs; Educação aberta; Ensino superior; Plataformas digitais;

TITLE: Mapping and Analysis of MOOCs in Public Higher Education Institutions

Abstract

The expansion of Massive Open Online Courses (MOOCs) has increased opportunities for access to online education; however, these courses are distributed across different platforms and institutions, making them difficult to locate. This study aimed to map MOOCs offered by Brazilian public higher education institutions and develop a digital tool to centralize and facilitate access to these courses. An exploratory study was conducted to identify

institutions and courses, followed by data organization and standardization using the general areas of the International Standard Classification of Education adapted for Brazil (Cine Brasil). A total of 981 MOOCs were identified and catalogued across 14 institutions, considering information such as institution, platform, field of knowledge, workload, certification, and website address. Based on this database, the Brazilian MOOCs Portal was developed, providing search mechanisms, navigation by institutions and fields of knowledge, a favorites system, and direct access to official course pages. The results highlight the diversity of available MOOCs and the concentration of courses in specific fields of knowledge, as well as the potential of a centralized tool to facilitate access to educational opportunities.

Keywords: MOOCs; Open education; Higher education; Digital platforms;

Introdução

A educação aberta contribui para redução das barreiras de acesso e a ampliação das oportunidades educacionais, apoiando-se, entre outras estratégias, no uso de tecnologias digitais. Entre as iniciativas associadas a esse movimento, destaca-se o Massive Open Online Course (MOOC), modalidade de curso online, aberto e massivo que possibilita a participação de um elevado número de pessoas, independentemente de sua localização geográfica, proporcionando maior flexibilidade de acesso à formação (BARGER, 2020; GRACIOSA; QUEIROZ, 2025).

No âmbito da educação superior, o MOOC representa uma possibilidade de ampliar o alcance das ações desenvolvidas pelas Instituições de Ensino Superior (IES), permitindo que conhecimentos produzidos nessas instituições sejam compartilhados para públicos que ultrapassam os limites institucionais e geográficos. Além de favorecer a formação continuada e a aprendizagem ao longo da vida, essa modalidade pode contribuir para a democratização e o compartilhamento do conhecimento, aproximando-se dos princípios da educação aberta (FREITAS et al., 2025; GRACIOSA; QUEIROZ, 2025).

A expansão dos MOOCs tem sido acompanhada pelo crescimento do número de cursos, instituições ofertantes e plataformas utilizadas para a oferta dos cursos, mas esta ampliação não significa, necessariamente, que as oportunidades educacionais existentes sejam facilmente localizadas pela comunidade universitária. A dispersão das informações entre diferentes plataformas e páginas institucionais pode dificultar a identificação das oportunidades disponíveis, uma vez que o interessado pode necessitar realizar buscas sucessivas em diferentes ambientes para encontrar os cursos que deseja.

No caso das Instituições Federais de Ensino Superior (IFES) brasileiras, essa questão assume especial relevância diante da autonomia das universidades para desenvolver e disponibilizar suas próprias iniciativas educacionais. Embora essa descentralização favoreça a diversidade e a autonomia

institucional, a distribuição das informações sobre os cursos em diferentes ambientes digitais pode dificultar uma visão integrada da oferta existente.

Diante desse cenário, mecanismos de agregação de informações podem contribuir para reduzir a dispersão informacional sem interferir na autonomia das instituições responsáveis pela oferta. Diferentemente de uma plataforma destinada a hospedar cursos, um portal agregador pode reunir e organizar informações provenientes de diferentes instituições em um único ambiente de consulta, direcionando posteriormente o usuário à página oficial do curso.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um portal para organizar, integrar e compartilhar informações sobre MOOCs oferecidos gratuitamente pelas universidades federais brasileiras, buscando facilitar sua localização e ampliar a visibilidade das iniciativas de educação aberta desenvolvidas por essas instituições.

Metodologia

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem qualitativa e descritiva, voltada ao desenvolvimento de uma solução tecnológica para organização e disseminação de informações sobre cursos do tipo Massive Open Online Courses (MOOCs) ofertados por instituições públicas brasileiras de ensino superior.

O trabalho foi desenvolvido em cinco etapas principais: definição do escopo da pesquisa, levantamento das instituições de ensino e dos cursos, coleta e organização dos dados, desenvolvimento do portal web e publicação da plataforma.

Inicialmente foi definido o escopo do projeto, estabelecendo como objetivo principal a construção de um portal capaz de reunir informações sobre MOOCs ofertados por universidades federais brasileiras de educação superior. A delimitação se restringiu às Instituições Federais de Ensino Superior (IFES), organizadas academicamente como Universidades. Foram considerados cursos com acesso gratuito ao conteúdo, disponíveis em plataformas digitais e caracterizados como MOOCs ou iniciativas equivalentes de educação aberta. A gratuidade do acesso não implica, necessariamente, gratuidade da certificação. Cursos indisponíveis, com acesso restrito ou sem informações suficientes para identificação foram excluídos da base.

Após a definição do escopo, iniciou-se uma pesquisa exploratória para identificação de universidades federais brasileiras que disponibilizavam MOOCs de acesso gratuito. A busca foi realizada nos sites das 69 universidades federais de diferentes regiões do Brasil, utilizando também buscas exploratórias na Internet por termos relacionados a MOOCs, cursos gratuitos, cursos online e cursos abertos associados às universidades. A partir

dos resultados encontrados, foram consultados os portais institucionais das universidades, ambientes virtuais de aprendizagem e plataformas próprias ou externas utilizadas para disponibilização dos cursos.

Para cada curso identificado, foram coletados dados como instituição ofertante, plataforma, temática, certificação, idioma, carga horária e endereço eletrônico, sendo os links posteriormente verificados quanto à disponibilidade.

Após a coleta, os dados foram organizados e padronizados em planilha eletrônica, com revisão das nomenclaturas, eliminação de duplicidades e verificação das informações catalogadas. Para a organização temática, as categorias inicialmente utilizadas foram substituídas pelas áreas gerais da Classificação Internacional Normalizada da Educação adaptada para o Brasil (Cine Brasil), adotando-se uma referência padronizada para classificação dos MOOCs (BRASIL, 2019). A classificação considerou principalmente o tema e o conteúdo indicado no título, nas palavras-chave e nas descrições dos cursos, com apoio de ferramenta de Inteligência Artificial na organização inicial dos registros e posterior revisão das classificações.

Concluída a organização da base de dados, iniciou-se o desenvolvimento do Portal Brasileiro de MOOCs. A plataforma foi implementada utilizando HTML5, CSS3 e JavaScript. Durante o desenvolvimento foram elaboradas diferentes versões da interface, priorizando princípios de usabilidade voltados à melhoria da experiência do usuário (NIELSEN, 1994). O portal foi estruturado para permitir pesquisa textual, navegação por instituições e pelas áreas do conhecimento da Cine Brasil, sistema de favoritos e acesso direto às páginas oficiais dos cursos. Também foram incorporados princípios de responsividade, possibilitando a utilização do portal em computadores, tablets e dispositivos móveis.

Após a conclusão do desenvolvimento, o portal foi disponibilizado publicamente por meio da plataforma Netlify, permitindo seu acesso pela Internet. Posteriormente foram realizadas as etapas de configuração do domínio público, validação da propriedade junto ao Google Search Console e indexação da plataforma pelos mecanismos de busca.

Resultados e Discussões

A pesquisa resultou na identificação e catalogação de 981 MOOCs provenientes de 14 universidades federais, distribuídos em diferentes plataformas digitais e com variações quanto à temática, carga horária e condições de certificação. A distribuição dos cursos entre as instituições mostrou-se heterogênea, com diferenças expressivas no número de MOOCs identificados em cada universidade.

A organização da base possibilitou reunir informações referentes à instituição ofertante, plataforma, temática, certificação, idioma, carga horária e endereço eletrônico dos cursos. O processo de padronização também permitiu revisar nomenclaturas, eliminar duplicidades e verificar as informações catalogadas.

A classificação dos cursos segundo as áreas gerais da Cine Brasil permitiu organizar a oferta a partir de uma referência única. Na base consolidada, a maior concentração ocorreu em Saúde e bem-estar, seguida por Educação, Artes e humanidades e Computação e TIC. As demais áreas apresentaram quantitativos menores.

A Figura 1 apresenta a distribuição dos MOOCs entre as áreas do conhecimento segundo a classificação da Cine Brasil, permitindo visualizar a concentração da oferta em determinados campos.

A coleta também evidenciou que as oportunidades permanecem distribuídas entre diferentes plataformas e páginas institucionais, o que dificulta sua localização de forma integrada. Esse resultado dialoga com Yuan e Powell (2013), que apresentam os MOOCs como uma estratégia capaz de ampliar o acesso à educação em larga escala. No contexto observado, porém, a existência dos cursos não garante, por si só, facilidade de acesso: a dispersão das informações exige que o usuário consulte diferentes ambientes para identificar oportunidades compatíveis com seus interesses.

Essa característica também se aproxima dos resultados de Perifanou e Economides (2022), que identificaram um ecossistema heterogêneo de plataformas de MOOCs, e de Goglio e Nascimbeni (2021), que caracterizaram a oferta como aberta, porém fragmentada. No levantamento realizado, observou-se situação semelhante, com cursos distribuídos entre diferentes plataformas e ambientes institucionais.

Nesse sentido, o Portal Brasileiro de MOOCs atua sobre uma dificuldade identificada durante a própria pesquisa, ao reunir em um único ambiente informações anteriormente dispersas. A centralização pode reduzir o esforço de busca e ampliar a visibilidade das iniciativas de educação aberta desenvolvidas pelas instituições públicas.

A disponibilização pública do portal também se relaciona às recomendações da UNESCO (2019) sobre Recursos Educacionais Abertos, especialmente quanto à ampliação do acesso ao conhecimento. Ao mesmo tempo, a organização da interface, os mecanismos de busca e a navegação simplificada aproximam a solução dos princípios de usabilidade discutidos por Nielsen (1994).

A Figura 2 apresenta a interface do Portal Brasileiro de MOOCs e suas principais funcionalidades, incluindo pesquisa textual, navegação por instituições e áreas do conhecimento da Cine Brasil, sistema de favoritos e acesso direto às páginas oficiais dos cursos.

A classificação dos cursos segundo as áreas gerais da Cine Brasil passou a orientar tanto a análise da base quanto os filtros e as áreas exibidas na versão

atualizada do portal. Dessa forma, a classificação utilizada na pesquisa foi incorporada à própria solução tecnológica.

Por fim, a publicação em ambiente web e a indexação no Google ampliam a possibilidade de descoberta da ferramenta para além do acesso direto ao endereço eletrônico, fortalecendo seu potencial de uso por estudantes, profissionais e demais interessados em cursos online de acesso aberto.

Conclusão

Este estudo teve como objetivo desenvolver um portal para organizar, integrar e compartilhar informações sobre MOOCs oferecidos pelas universidades federais brasileiras, buscando facilitar a localização e ampliar a visibilidade das iniciativas de educação aberta desenvolvidas por essas instituições.

A pesquisa possibilitou identificar e organizar 981 MOOCs oferecidos por 14 universidades federais, o que mostra, por um lado, a existência de uma oferta expressiva de oportunidades de formação online e, por outro, sua dispersão entre diferentes plataformas e ambientes institucionais. A distribuição dos cursos também se mostrou heterogênea entre as universidades e as áreas do conhecimento, reforçando a importância de mecanismos que permitam visualizar de forma integrada as oportunidades existentes.

Como resultado, foi desenvolvido o Portal Brasileiro de MOOCs, que reúne as informações em um único ambiente digital e disponibiliza mecanismos de pesquisa textual, navegação por universidade e área do conhecimento, seleção de favoritos e acesso direto às páginas oficiais dos cursos. A adoção das áreas gerais da Cine Brasil como referência para classificação contribuiu para padronizar as informações e facilitar a consulta às diferentes ofertas.

Como principal limitação do portal, destaca-se que, nesta etapa, o levantamento foi restrito às universidades federais brasileiras, não abrangendo a totalidade das IES públicas do país. Além disso, por se tratar de uma ferramenta baseada em informações disponibilizadas pelas próprias instituições, sua continuidade requer procedimentos periódicos de atualização e verificação dos cursos e respectivos endereços eletrônicos.

Como etapas futuras, pretende-se ampliar progressivamente a abrangência do portal por meio da inclusão de MOOCs ofertados por IES públicas estaduais, municipais e distritais, além da atualização periódica da base de cursos. Também está prevista a avaliação do portal junto aos usuários, permitindo identificar oportunidades de aprimoramento relacionadas à usabilidade, aos mecanismos de busca e à organização das informações.

Referências

BARGER, R. P. Democratization of education through massive open online courses in Asia. IAFOR Journal of Education: Technology in Education, v. 8, n. 2, 2020. Disponível em: https://iafor.org/journal/iafor-journal-of-education/volume-8-issue2/article-2/. Acesso em: 10 jul. 2026.

BRASIL. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. Manual para classificação dos cursos de graduação e sequenciais: Cine Brasil 2018. Brasília, DF: Inep, 2019.

FREITAS, Maria do Carmo Duarte et al. Educação aberta e universidades inteligentes: integrando tecnologias e pessoas na Educação Superior. In: LOPES JUNIOR, Geraldo; SOUZA, Gustavo Henrique Silva de; COELHO, Jorge Artur Peçanha de (org.). Educação e inovação: novas práticas, experiências pós-pandemia e proposições teóricas atuais. Montes Claros: Editora IFNMG, 2025.

GOGLIO, Valentina; NASCIMBENI, Fabio. MOOCs in Italy: an open and fragmented landscape. Italian Journal of Educational Technology, 2021. DOI: 10.17471/2499-4324/1233.

GRACIOSA, M. L. H.; QUEIROZ, F. C. B. P. Educação aberta e Massive Open Online Courses (MOOCs): caminhos para a democratização do conhecimento. EaD & Tecnologias Digitais na Educação, v. 13, n. 20, 2025.

NIELSEN, Jakob. Usability engineering. Boston: Academic Press, 1994.

PERIFANOU, Maria; ECONOMIDES, Anastasios A. The landscape of MOOC platforms worldwide. The International Review of Research in Open and Distributed Learning, v. 23, n. 3, p. 104-133, 2022. DOI: 10.19173/irrodl.v23i3.6294.

UNESCO. Recommendation on Open Educational Resources (OER). Paris: UNESCO, 2019.

YUAN, Li; POWELL, Stephen. MOOCs and open education: implications for higher education. Bolton: JISC CETIS, 2013.

Anexos



Figura 1 — Distribuição dos MOOCs por área do conhecimento segundo a Cine Brasil.



Figura 2 — Interface e funcionalidades do Portal Brasileiro de MOOCs.

CÓDIGO: ET1175

AUTOR: FERNANDA ABREU SOARES

ORIENTADOR: OSVALDO CHIAVONE FILHO

TÍTULO: Estudo do Equilíbrio Líquido-Vapor de Sistemas Contendo Etanol, Ácidos Graxos e Bio-óleo para Aplicação em Processos de Separação

Resumo

A utilização de biomassa como matéria-prima para obtenção de combustíveis e produtos químicos tem ampliado a necessidade de compreender as etapas de separação envolvidas nesses processos. Neste trabalho, investigou-se o equilíbrio líquido-vapor (ELV) de sistemas de interesse para o fracionamento de produtos derivados de biomassa. Inicialmente, foi estudado o sistema bio-óleo de eucalipto + etanol, utilizando o ebuliômetro Othmer modificado e técnicas de caracterização das fases. O estudo determinou dados de ELV para os sistemas etanol + ácido oleico, etanol + ácido linoleico e etanol + bio-óleo de eucalipto Foram obtidos dados de temperatura, pressão e composição das fases líquida e vapor, além de informações de pressão de vapor dos componentes puros. Os dados foram tratados pelas correlações de Clausius–Clapeyron e Antoine e correlacionados pelo modelo UNIQUAC. O modelo UNIQUAC representou adequadamente os dados experimentais, com desvios absolutos relativos médios de pressão e desvio absoluto médio na composição da fase vapor de, respectivamente, de 0,18% e 0,0016 para etanol + ácido oleico e, 0,20% e 0,0023 para etanol + ácido linoleico. Os resultados demonstram a importância da obtenção de dados experimentais e da modelagem termodinâmica para compreender o comportamento dessas misturas e fornecer informações aplicáveis ao desenvolvimento e à simulação de processos de separação.

Palavras-chave: Equilíbrio líquido-vapor; bio-óleo; etanol; ácidos graxos; UNIQUAC

TITLE: A Study of the Liquid–Vapour Equilibrium in Systems Containing Ethanol, Fatty Acids and Bio-oil for Application in Separation Processes

Abstract

The use of biomass as a feedstock for the production of fuels and chemicals has increased the need to understand the separation stages involved in these processes. In this study, the liquid–vapour equilibrium (LVE) of systems of interest for the

fractionation of biomass-derived products was investigated. Initially, the eucalyptus bio-oil + ethanol system was studied, using a modified Othmer boiling apparatus and phase characterisation techniques. The study determined LVE data for the ethanol + oleic acid, ethanol + linoleic acid and ethanol + eucalyptus bio-oil systems. Data on temperature, pressure and composition of the liquid and vapour phases were obtained, along with vapour pressure information for the pure components. The data were processed using the Clausius–Clapeyron and Antoine correlations and fitted to the UNIQUAC model. The UNIQUAC model adequately represented the experimental data, with mean relative absolute deviations in pressure and mean absolute deviation in vapour-phase composition of 0.18 per cent and 0.0016, respectively, for ethanol + oleic acid, and 0.20 per cent and 0.0023 for ethanol + linoleic acid. The results demonstrate the importance of experimental data and thermodynamic modelling in understanding the behaviour of these mixtures and in providing information applicable to the development and simulation of separation processes.

Keywords: Vapor-liquid equilibrium; ethanol; bio-oil; fatty acids; UNIQUAC

Introdução

A necessidade de reduzir a dependência de recursos fósseis tem impulsionado o desenvolvimento de rotas alternativas para obtenção de energia e produtos químicos a partir de matérias-primas renováveis. Nesse cenário, a biomassa lignocelulósica apresenta grande potencial, uma vez que pode ser convertida em diferentes produtos por processos termoquímicos.A pirólise destaca-se como um processo, no qual a biomassa lignocelulósica é submetida a temperaturas elevadas em condições de ausência ou baixa disponibilidade de oxigênio, produzindo frações gasosa, sólida e líquida. A fração líquida, conhecida como bio-óleo, é constituída por uma mistura complexa de compostos orgânicos com diferentes estruturas, massas molares, polaridades e volatilidades.

O aproveitamento do bio-óleo exige o desenvolvimento de etapas de processamento capazes de separar e direcionar seus diferentes constituintes para aplicações específicas. Nesse contexto, o equilíbrio de fases possui papel fundamental, pois permite compreender como os componentes de uma mistura se distribuem entre as fases em determinadas condições de temperatura, pressão e composição. Essas informações são essenciais para operações como destilação, evaporação, recuperação de solventes e demais processos de separação.

O equilíbrio líquido-vapor (ELV) assume particular importância quando os componentes apresentam diferenças significativas de volatilidade. Em sistemas reais, entretanto, as interações intermoleculares podem provocar desvios em relação ao comportamento ideal, tornando necessária a utilização de modelos termodinâmicos para descrever as não idealidades do sistema . Neste contexto, a obtenção de dados experimentais de ELV, associada à modelagem

termodinâmica, permite gerar informações necessárias ao desenvolvimento e à simulação de processos de separação.

Apesar de representar uma condição mais próxima da complexidade encontrada em uma matéria-prima real, o estudo de uma mistura como o bio-óleo apresenta dificuldades para avaliar individualmente as interações entre seus constituintes. Por esse motivo, a continuidade da pesquisa foi direcionada ao estudo de sistemas binários contendo etanol e ácidos graxos, permitindo analisar de maneira mais controlada o comportamento termodinâmico de compostos de baixa volatilidade.

Foram estudados os sistemas etanol + ácido oleico e etanol + ácido linoleico e etanol + bio-óleo derivado da pirólise do eucalipto. O sistemas com os ácidos graxos são caracterizadas como misturas sintéticas, enquanto o sistema pseudo-binário etanol + bio-óleo, correspondem a uma mistura real. Os ácidos graxos apresentam interesse no estudo de misturas provenientes de óleos e matérias-primas renováveis, como na indústria oleoquímica, e na produção de biocombustíveis, como o biodiesel.O bio-óleo de eucalipto também apresenta potencial de aplicação industrial, devido à sua composição diversificada e à possibilidade de aproveitamento de seus componentes em diferentes processos de valorização da biomassa.

Além disso, a diferença estrutural entre os dois ácidos permite investigar como suas características moleculares influenciam o comportamento do equilíbrio.

Dados de ELV para estes sistemas apresentam-se bastante limitados na literatura. Portanto, este trabalho teve como objetivo determinar dados de equilíbrio líquido-vapor para os sistemas com ácidos graxos e bio-óleo derivado de pirólise em etanol, a fim de contribuir no processamento de biomassas e biocombustíveis.

Metodologia

A metodologia envolveu etapas experimental e computacional. A etapa experimental correspondeu à determinação dos dados de ELV; calibrações para determinar a composição dos sistemas estudados e correção de equipamentos e caracterização química das fases de equilíbrio líquido-vapor para o sistema envolvendo o etanol + bio-óleo. A seção computacional abordou um tratamento termodinâmico de modelagem para o sistema de ácidos graxos.

A pesquisa foi, inicialmente, direcionada ao estudo do sistema etanol + bio-óleo de eucalipto. A escolha do etanol está relacionada à sua utilização como solvente na solubilização do bio-óleo, possibilitando a investigação experimental da distribuição dos seus componentes entre as fases.

2.1 Sistema etanol + bio-óleo de eucalipto

Inicialmente, foram realizados procedimentos de calibração dos equipamentos utilizados durante os experimentos. A calibração teve como finalidade garantir maior confiabilidade às medidas de temperatura, pressão e densidade empregadas na determinação das condições de equilíbrio e da composição das fases. Foram utilizados sistemas de referência adequados para a calibração dos termômetros e do densímetro, enquanto o sistema de medição de pressão foi avaliado em diferentes condições.

Os ensaios de equilíbrio líquido-vapor foram realizados utilizando um ebuliômetro de Othmer modificado (Figura 1). A mistura de bio-óleo e etanol foi submetida, simultaneamente, a aquecimento e agitação, promovendo a formação contínua de vapor. O vapor produzido era conduzido ao condensador e posteriormente retornava ao sistema, permitindo a recirculação das fases.

Os experimentos foram conduzidos com controle da pressão por meio de bomba de vácuo e válvula manual. Foi utilizado atmosfera de gás inerte (N2) com o objetivo de evitar degradação oxidativa. O estado de equilíbrio foi determinado a partir da estabilização das temperaturas e da taxa de reciclo do vapor condensado. Após o estabelecimento das condições estacionárias, foram coletadas amostras das fases para caracterização.

A caracterização das amostras foi realizada por diferentes técnicas. A densimetria foi utilizada como ferramenta para auxiliar na determinação da composição das fases, enquanto a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG/EM) foi empregada para identificar os principais constituintes presentes na alimentação ao ebuliômetro Othmer para a mistura etanol + bio-óleo e na fase vapor.

2.2 Sistemas etanol + ácido oleico e etanol + ácido linoleico

Após o estudo do sistema contendo bio-óleo, foram realizados estudos para os sistemas binários constituídos por etanol e ácidos graxos. Antes da realização dos ensaios, foram construídas curvas de calibração para o termômetro e para a determinação da densidade, garantindo maior confiabilidade às medidas experimentais.

O sistema etanol + ácido oleico foi estudado em um ebuliômetro de Othmer modificado. Os ensaios foram realizados na pressão atmosférica de gás inerte, com pressão média de 101,1 kPa. As composições de ácido oleico estudadas abrangeram aproximadamente 1,4 a 30,6% em massa de ácido oleico.

Para o sistema etanol + ácido linoleico, além do ebuliômetro Othmer foi utilizado também um ebuliômetro Fischer (Figura 2). O equipamento permite a recirculação de ambas as fases e a coleta das amostras após a estabilização do sistema. Nesse caso, os experimentos foram conduzidos em diferentes pressões, abrangendo aproximadamente 40 a 101 kPa, permitindo a obtenção de diferentes condições isobáricas.

Durante os ensaios, a temperatura foi monitorada por um sensor PT-100. Após a estabilização do equilíbrio, foram coletadas amostras da fase líquida e do

vapor condensado. As composições foram determinadas por meio das curvas de calibração construídas, a partir de medidas de densidade.

2.4 Modelagem termodinâmica

Os parâmetros binários do modelo UNIQUAC foram determinados a partir da correlação dos dados experimentais e de informações de atividade em diluição infinita disponíveis na literatura. Posteriormente, esses parâmetros foram empregados para avaliar a capacidade do modelo de representar e prever o comportamento dos sistemas em diferentes condições de composição.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos ao longo da pesquisa permitiram analisar o equilíbrio líquido-vapor sob duas perspectivas complementares. Inicialmente, foi investigado o comportamento global de uma mistura complexa, representada pelo bio-óleo de eucalipto. Posteriormente, o estudo foi aprofundado por meio de sistemas binários, permitindo avaliar de maneira mais detalhada as interações entre o etanol e compostos graxos.

3.1 Sistema bio-óleo de eucalipto + etanol

Os procedimentos de calibração realizados para os equipamentos utilizados apresentaram bons ajustes (Figura 3), indicando adequada relação entre os valores medidos e os valores de referência. Essa etapa foi fundamental para garantir confiabilidade às medidas utilizadas posteriormente na construção dos diagramas de equilíbrio e na determinação das composições das fases.

Os experimentos realizados em diferentes condições de pressão mostraram que a temperatura de equilíbrio depende tanto da pressão quanto da composição da mistura (Figura 4). A redução da pressão provocou diminuição das temperaturas de equilíbrio, enquanto o aumento da composição de bio-óleo modificou progressivamente o comportamento das fases.

O comportamento observado está diretamente relacionado à diferença de volatilidade entre o etanol e os constituintes do bio-óleo. Como o etanol apresenta maior volatilidade, sua concentração na fase vapor foi superior à observada na fase líquida. Em contrapartida, os componentes de maior massa molar e menor volatilidade permaneceram preferencialmente na fase líquida.

A análise da fase vapor por CG-EM (Tabela 1) demonstrou que sua composição não é determinada apenas pela quantidade total de bio-óleo presente na mistura, mas também pelas características individuais dos seus constituintes. Foram identificados compostos pertencentes a diferentes classes químicas, incluindo compostos fenólicos derivados da lignina, como guaiacol, siringol e cresol, além de outros compostos oxigenados.

Os resultados obtidos nessa etapa indicaram uma fase vapor rica em etanol e permanência preferencial dos compostos menos voláteis na fase líquida. A caracterização da fase vapor permitiu identificar compostos mais voláteis derivados do bio-óleo como aldeídos, cetonas e compostos fenólicos.

3.2 Sistemas etanol + ácido oleico e etanol + ácido linoleico

Foram obtidos 14 pontos experimentais de equilíbrio líquido-vapor para o sistema etanol + ácido oleico (Tabela 2), em pressão média de aproximadamente 101,1 kPa. As composições das fases foram determinadas a partir das medidas de densidade e das curvas de calibração (Figura 5) estabelecidas previamente.

Os resultados mostraram uma diferença acentuada entre as composições das fases líquida e vapor. A fase vapor apresentou elevada concentração de etanol, enquanto o ácido oleico permaneceu predominantemente na fase líquida. Esse comportamento é coerente com a diferença de volatilidade entre os dois componentes.

O diagrama de fases T–x,y (Figura 6) indicou comportamento não ideal e desvio positivo em relação à idealidade indicando interações intermoleculares entre as moléculas de etanol e ácido linoleico menores do que entre as espécies puras. Dessa forma, demonstra-se a importância do modelo de coeficiente de atividade para descrever adequadamente a fase líquida (UNIQUAC).

Na sequência, o sistema etanol + ácido linoleico foi investigado em uma ampla faixa de pressão, aproximadamente entre 40 e 101 kPa (Tabela 3). Foram obtidas sete condições isobáricas.

Assim como observado para o ácido oleico, houve uma predominância de etanol na fase vapor. A diferença de volatilidade entre o etanol e o ácido linoleico representa a distribuição fortemente assimétrica das espécies entre as fases.

Os resultados (Figura 7) também apresentaram desvio positivo da idealidade. Entretanto, este sistema apresentou comportamento mais pronunciado nesse aspecto, se comparado ao ácido oleico. Uma possível explicação está relacionada à estrutura molecular dos ácidos graxos: o ácido oleico possui uma ligação dupla, enquanto o ácido linoleico apresenta duas. Essa diferença estrutural influencia as propriedades físico-químicas dos compostos e suas interações com o etanol.

A realização dos experimentos em diferentes pressões foi particularmente importante porque permitiu ampliar a faixa de condições experimentais disponíveis para avaliação dos modelos.

3.5 Comparação entre os sistemas com ácido oleico e ácido linoleico

A comparação entre os dois sistemas evidencia a influência da natureza do ácido graxo no equilíbrio líquido-vapor (ELV). Em ambos os casos, a fase vapor apresentou concentração elevada de etanol, demonstrando que a diferença de volatilidade entre o álcool e os ácidos graxos é o principal fator responsável pela distribuição observada.

Contudo, os sistemas não apresentaram comportamento completamente equivalente. O sistema com ácido linoleico apresentou maior desvio da idealidade, indicando que pequenas alterações na estrutura molecular do componente de baixa volatilidade podem modificar significativamente as interações intermoleculares da mistura.

Esse resultado reforça a importância de utilizar dados experimentais específicos para cada sistema. A utilização de propriedades de compostos semelhantes como simples substitutos pode não ser suficiente para representar com precisão o comportamento de uma mistura, especialmente quando se pretende utilizar esses dados em projetos ou simulações de processos.

A obtenção de dados experimentais para os dois sistemas permite, portanto, ampliar a base de informações termodinâmicas disponíveis para misturas envolvendo etanol e ácidos graxos.

Conclusão

O trabalho permitiu ampliar a investigação do equilíbrio líquido-vapor aplicado a sistemas de interesse para processos de separação, partindo do estudo de uma mistura complexa, o bio-óleo de eucalipto + etanol, para sistemas binários contendo etanol e os ácidos graxos oleico e linoleico.

Os resultados para o bio-óleo mostraram que a diferença de volatilidade entre os componentes enriquece a fase vapor em etanol e retém os compostos mais pesados na fase líquida. A caracterização da fase vapor confirmou a presença de diversos compostos orgânicos, que correspondem a uma fração mais volátil do bio-óleo. Estas informações evidenciam o uso do equilíbrio de fases como uma ferramenta viável para o fracionamento.

Os sistemas etanol + ácido oleico e etanol + ácido linoleico apresentaram comportamento não ideal, caracterizado por um desvio positivo e enriquecimento de etanol na fase vapor. O sistema contendo ácido linoleico apresentou maior desvio, demonstrando a influência da estrutura molecular e forças intermoleculares do ácido graxo sobre o comportamento da mistura.

A modelagem termodinâmica apresentou resultados satisfatórios. O modelo UNIQUAC representou os dados experimentais com desvios médios relativos de pressão de 0,18% para etanol + ácido oleico e 0,20% para etanol + ácido linoleico, esse comportamento possui relevância para processos de separação

porque indica uma elevada seletividade natural do equilíbrio em favor do etanol na fase vapor. Assim, sistemas dessa natureza podem ser utilizados como referência para compreender operações destinadas à recuperação de solventes em misturas contendo compostos graxos.

além de apresentar capacidade de predição em condições distintas das utilizadas no ajuste. Os resultados demonstram que a combinação entre experimental e modelagem termodinâmica fornece uma metodologia consistente para caracterizar sistemas de interesse em processos de separação.

Referências

CHIARADIA, Mariza C.; COLLINS, Carol H.; JARDIM, Isabel C. S. F.

O estado da arte da cromatografia associada à espectrometria de massas acoplada à espectrometria de massas na análise de compostos tóxicos em alimentos. Química Nova, Campinas, v. 31, n. 3, p. 623–636, 2008. doi:10.1590/S0100-40422008000300030.

ALMEIDA, Priscylla. O consumo de combustíveis fósseis e o alarmante efeito nos biomas brasileiros: avanços da matriz energética brasileira e os desafios no cenário atual das mudanças climáticas. Ciência e Cultura, São Paulo, v. 75, n. 4, 2023. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252023000400017. Acesso em: 6 ago. 2025.

RODRIGUES, Letícia Demuner. Contribuições para o estudo da pirólise da casca de eucalipto. 2018. 70 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2018.

CARDOSO, E. A., GALVÃO, V. A. N., SANTOS, V. L., OLIVEIRA, M. L., SANTOS, R. C., & PONTES, L. A. M. (2023). Uma Revisão acerca de biorrefinarias com base lignocelulósic: aspectos atuais. Latin American Journal of Energy Research, 10(1), 67–76. https://doi.org/10.21712/lajer.2023.v10.n1.p67-76

Félix, Camila & Júnior, Aroldo & Freitas, Carolina & Pires, Carlos & Teixeira, Victor & Frety, Roger & Brandao, Soraia. (2018). Pirólise rápida de biomassa de eucalipto na presença de catalisador Al-MCM-41. Matéria (Rio de Janeiro). 22. DOI: 10.1590/s1517-707620170005.0251.

DIEHL, Lisiane de Oliveira. Avaliação das características de bio-óleo e biochar produzidos por pirólise a partir de biomassas lignocelulósica. 2023. 146 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria, 2023.

PRAUSNITZ, J. M.; LICHTENTHALER, R. N.; AZEVEDO, E. G. Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria (3ª ed., Prentice Hall, 1999).

FOELKEL, Celso. As Biorrefinarias Integradas no Setor Brasileiro de Fabricação de Celulose e Papel. Eucalyptus Online Book & Newsletter. 2. ed. Cap 29, 2023. p. 6-242. Disponível em: Eucalyptus Online Book_Capítulo -29-Biorrefinarias_celulose_papel_Revisão 8 2023. Acesso em: 7 ago. 2025.

MELO, Augusto César Cardoso de. Equilíbrio líquido-líquido aplicado à separação de produtos da pirólise de biomassa. 2014. 76f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2014.

C.E.C. Rodrigues, E.C.D. Peixoto, A.J.A. Meirelles, Phase equilibrium for systems composed by refined soybean oil + commercial linoleic acid + ethanol + water, at 323.2 K, Fluid Phase Equilib. 261 (2007) 122–128. https://doi.org/10.1016/j.fluid.2007.07.021.

H.N.M. de Oliveira, Determinação de dados de Equilíbrio Líquido- Vapor para Sistemas Hidrocarbonetos e Desenvolvimento de uma nova Célula Dinâmica, (2003) 190. http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/bitstream/123456789/15939/1/HumbertoNMO_tes e.pdf

A.G. Ramazanova, V.I. Yashkova, O. V. Balmasova, V. V. Korolev, E. V. Ivanov, Volume properties of solutions of oleic, linoleic, and linolenic acids in n-hexane and n-heptane at 298.15 K, Russian Chemical Bulletin 2006 55:4 55 (2006) 666–671. https://doi.org/10.1007/s11172-006-0310-3.

P.L. Penedo, G.L.V. Coelho, M.F. Mendes, Phase equilibria of oleic, palmitic, stearic, linoleic and linolenic acids in supercritical Co2, Brazilian Journal of Chemical Engineering 26 (2009) 137–147. https://doi.org/10.1590/s0104-66322009000100013.

D. Ambrose, C.H.S. Sprake, Thermodynamic properties of organic oxygen compounds XXV. Vapour pressures and normal boiling temperatures of aliphatic alcohols, J. Chem. Thermodyn. 2 (1970) 631–645. https://doi.org/10.1016/0021-9614(70)90038-8.

A.F. Gallaugher, H. Hibbert, Studies on Reactions relating to carbohydrates and polysaccharides. LIV. The Surface Tension Constants of the polyethylene glycols and their derivatives., J. Amer. Chem. Soc. 59 (1939) 2514.

T. Schmeling, R. Strey, Equilibrium Vapor Pressure Measurements for the n-Alcohols in the Temperature Range from −30 °C to + 30 °C, Berichte Der Bunsengesellschaft Für Physikalische Chemie 87 (1983) 871–874. https://doi.org/10.1002/BBPC.19830871008.

N. Kamihama, H. Matsuda, K. Kurihara, K. Tochigi, S. Oba, Isobaric vapor-liquid equilibria for ethanol + water + ethylene glycol and its constituent three binary systems, J. Chem. Eng. Data 57 (2012) 339–344. https://doi.org/10.1021/je2008704.

A. Mejía, M. Cartes, Experimental Determination of Isobaric Vapor-Liquid Equilibrium and Isothermal Interfacial Tensions for the Binary Ethanol + Cyclopentyl Methyl Ether Mixture, J. Chem. Eng. Data 64 (2019) 1970–1977. https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b01000.

Anexos



Figura 2 - Diagrama esquemático da Célula de Fischer



Figura 1- Esquema do ebuliômetro de Othmer modificado



Figura 3 - Curvas de calibração para correção da temperatura, pressão e determinação da composição do sistema etanol + bio-óleo de eucalipto.



Figura 4 - Diagramas de equilíbrio líquido-vapor (T-x,y) para o sistema etanol + bio-óleo de eucalipto em diferentes pressões.



Figura 5 - Curvas de calibração para correção da temperatura de equilíbrio e determinação da composição dos sistemas etanol + ácido oleico e etanol + ácido linoleico.



Figura 6 - diagrama de fases T–x,y para o sistema etanol + ácido oleico



Figura 7 - diagrama de fases T–x,y para o sistema etanol + ácido linoleico



Tabela 1 - Composição química da fase vapor identificada por CG-EM.



Tabela 2 - Dados experimentais de equilíbrio líquido-vapor (T–P–x–y)[a] para o sistema etanol + ácido oleico, obtidos a 101,1 kPa em ebuliômetro de Othmer.



Tabela 3 - Dados experimentais de equilíbrio líquido-vapor (T–P–x–y)[a] do sistema etanol + ácido linoleico, determinados em ebuliômetro de Fischer sob sete condições de pressão constante.

CÓDIGO: ET1180

AUTOR: MARIA EDUARDA ARAUJO DA HORA

ORIENTADOR: EVERALDO SILVINO DOS SANTOS

TÍTULO: Viabilidade e avaliação de atividade emulsificante de biossurfactantes produzidos por cepas de Bacillus subtilis de diferentes tempos de armazenamento

Resumo

Biossurfactantes são compostos tensoativos anfifílicos produzidos durante o metabolismo secundário de microrganismos, como fungos e bactérias. Destacam-se, entre essas substâncias, a surfactina e a iturina, sintetizadas por espécies do gênero Bacillus, especialmente Bacillus subtilis. Estes metabólitos são amplamente investigados na área biotecnológica devido aos seus potenciais efeitos antimicrobianos, antifúngicos e antivirais, seja em aplicações na formulação de fármacos ou na produção de agentes desinfetantes, que auxiliam na prevenção de patologias. Neste estudo, observou-se por meio da quantificação por Cromatografia líquida de alta eficiência que uma das cepas utilizadas, proveniente do banco de microrganismos (sem reativações contínuas) obteve a maior produtividade de surfactina (12,1 mg/L), enquanto as cepas submetidas a repiques frequentes apresentaram quedas drásticas na produção dos biossurfactantes. As cepas com maior concentração de surfactina exibiram atividade emulsificante satisfatória durante determinados intervalos de repouso. Conclui-se que o repique sucessivo pode causar degeneração das culturas, reduzindo a biossíntese de metabólitos secundários, ressaltando a necessidade de métodos que otimizem a produção destes compostos.

Palavras-chave: Surfactina. Degeneração de culturas. Atividade emulsificante.

TITLE: Microbial viability and evaluation of emulsification activity of biosurfactants produced by Bacillus subtilis strains with different storage times

Abstract

Biosurfactants are amphiphilic surface-active compounds produced in the secondary metabolism of microorganisms, such as fungi and bacteria. Prominent among these substances are surfactin and iturin, synthesized by species of the genus Bacillus, particularly Bacillus subtilis. These metabolites are widely investigated in the field of biotechnology due to their potential antimicrobial, antifungal, and antiviral effects, with applications in formulating pharmaceuticals and disinfectant agents that aid in disease

prevention. In this study, quantification by High-Performance Liquid Chromatography revealed that one of the strains used, originating from the culture collection (without continuous reactivations), achieved the highest surfactin productivity (12.1 mg/L), whereas strains subjected to frequent subculturing showed drastic declines in yield. Strains with higher surfactin concentrations exhibited satisfactory emulsifying activity during specific resting intervals. It is concluded that successive subculturing causes strain degeneration, reducing the biosynthesis of secondary metabolites and highlighting the need for methods that optimize the production of these compounds.

Keywords: Surfactin. Culture degeneration. Emulsification activity.

Introdução

Bactérias do gênero *Bacillus* são microrganismos Gram-positivos amplamente distribuídos no solo, na água e no ar, além de integrarem a microbiota do trato gastrointestinal de diversos organismos. Espécies desse gênero destacam-se pela síntese de metabólitos secundários com expressiva atividade antimicrobiana, a exemplo das bacteriocinas e dos biossurfactantes (HONG, 2009).

As bacteriocinas são moléculas peptídicas produzidas durante processos metabólicos associados ao crescimento e à reprodução de certas bactérias, principalmente comensais, auxiliando-as no processo de competitividade e sendo componentes com um papel crucial no mecanismo de defesa contra outras espécies. Devido a esta capacidade, desempenham um papel importante na composição e na homeostase do microbioma. (LU, 2018; HEILBRONNER, 2021;).

Por sua vez, os surfactantes constituem uma classe de compostos tensoativos anfifílicos, caracterizados pela presença de regiões hidrofóbicas e hidrofílicas na mesma estrutura molecular, o que lhes confere a capacidade de reduzir a tensão superficial e interfacial, diminuindo os valores da concentração micelar crítica (CMC). Estes compostos podem ser obtidos de maneira natural ou artificialmente, de maneira sintética. (ZAJIC; SEFFENS; PANCHAL, 1983).

Nesse contexto, biossurfactantes são tensoativos produzidos de maneira natural e sustentável por microrganismos, como as bactérias e os fungos. Dentre as diferentes classes de biossurfactantes, destacam-se os lipopeptídeos, em especial a surfactina, devido a suas aplicações nas mais diversas áreas como na medicina, agricultura, biorremediação, cosméticos, ramo farmacêutico e alimentício, além apresentar atividade antibacteriana, antiviral e antifúngica (DRAKONTIS, 2020).

A surfactina compreende um conjunto de isoformas que, juntamente a iturina e a fengicina, integram o grupo dos principais lipopeptídeos microbianos. Produzidas por várias espécies de bactérias e fungos, *Pseudomonas* e *Bacillus* são descritos como gêneros bacterianos considerados eficientes produtores de biossurfactantes (ARIMA, 1968; SILVA, 2014).

Em comparação aos surfactantes sintéticos, os biossurfactantes apresentam menor toxicidade, grande diversidade estrutural, maior facilidade em sua produção,

biodegradabilidade e aplicabilidade em diversas áreas, surgindo como uma alternativa sustentável, assim denominados de “surfactantes verdes” (NAGTODE, 2023).

Contudo, microrganismos que são submetidos a vários repiques podem passar pelo processo de degeneração de culturas, no qual apresentam dificuldade de manter suas características morfológicas e biossintéticas anteriores e até mesmo o funcionamento adequado de seu metabolismo, podendo diminuir a produção de metabólitos secundários. Este processo pode ser observado com grande frequência em bactérias industriais fermentadoras (REUSSER, 1963; PENG & LIANG, 2020).

Metodologia

OBTENÇÃO E MANUTENÇÃO DO MICRORGANISMO

As cepas de *Bacillus subtilis* utilizadas nesta pesquisa vieram de dois diferentes locais de armazenamento. Duas das cepas foram retiradas do banco de microrganismos do Laboratório de Engenharia Bioquímica da UFRN (LEB/DEQ), nas quais eram mantidas armazenadas em -80ºC. Três das cepas foram anteriormente cultivadas por outros pesquisadores do laboratório citado, sendo mantida na geladeira exclusiva para microrganismos. Todas as cepas foram originalmente doadas pelo Departamento de Antibióticos da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

As cepas retiradas do banco de microrganismos foram: CCT 7457, UFPEDA 438.

A cepa que foi retirada da geladeira de microrganismos do LEB também é UFPEDA 438, reativada em 2021 e 2024, para poder avaliar se o repique contínuo dessas bactérias modificaram o padrão de produção dos biossurfactantes.

Os microrganismos estavam em repouso e mantidos em refrigeração, o que indica que estavam em fase inativa. Desse modo, para prepará-los para a produção, fez-se necessária a reativação, processo no qual se retorna à atividade bacteriana do microrganismo, por meio da técnica de cultivo com Caldo Infusão Cérebro e Coração (em inglês: Brain Heart Infusion Broth – BHI) em duplicata, com modificações na composição do meio, sem a adição do corante vermelho de metila a 0,1%, segundo a metodologia de RODRIGUES (2024).

CULTIVO DO MICRORGANISMO

Os microrganismos foram submetidos ao processo de Pré-inóculo para que se houvesse uma adaptação às condições do meio no qual foi realizado o Cultivo. Para ambas as fases foi utilizado o Meio de Rocha que apresenta em sua composição:

- (NH4)2SO4 a 1,0 g/L;
- MgSO4.7H2O a 0,25 g/L;

- Solução estoque de sais (EDTA a 0,01 g/100mL, MnSO4.H2O a 0,3 g/100mL, FeSO4.7H2O a 0,01g/100mL, CaCl2 a 0,01 g/100mL, CoCl2.6H2O a 0,01g/100mL e ZnSO4.7H2O a 0,01 g/100mL;
- Melaço de cana-de-açúcar;
- Tampão fosfato de sódio (100,0 mM, pH 7,0).

Na fase de Pré-inóculo, foi utilizado 0,5 mL do repique da fase de reativação para cada cepa, dispondo das seguintes condições de cultivo: 30°C e rotação de 150 rpm por 24h. Durante esta fase, as bactérias foram identificadas da seguinte forma:

- As armazenadas no banco de microrganismos

1. BCC (cepa CCT 7457);
2. 438-21 (UFPEDA 438);
3. 438-23 (UFPEDA 438);

- As previamente utilizadas e reservadas em geladeira comum

1. P21;
2. P24;

A numeração final (21, 23 e 24) está relacionada ao ano que as cepas foram adquiridas ou o ano no qual haviam sido reativadas pela última vez.

Após as 24h de Pré-inóculo, foram observadas a quantidade de células de cada frasco e feita a contagem por meio da Câmara de Neubauer (Figura 1), para que o cultivo de células fosse uniformemente distribuído entre todas as cepas. Posteriormente a contagem, foi realizado o cultivo em triplicata no Meio de Rocha nas seguintes condições: razão de aeração de 0,4 v/v a partir do volume do meio de cultivo/volume do frasco; a 36°C com velocidade de agitação de 150 rpm por 24h, de acordo com Rocha (2017) e Paiva (2023).

Após o cultivo, também foi realizada a coloração de Gram para a comprovar a presença de bacilos gram-positivos na amostra (Figura 2).

EXTRAÇÃO DOS BIOSSURFACTANTES

No processo de extração, os caldos fermentados com Meio Rocha no qual foram feitos os cultivos foram transferidos para tubos cônicos de 50 mL e submetidos a centrifugação em 2.500 rpm, a 4°C durante 15 minutos, para o recolhimento do sobrenadante. Em seguida, o sobrenadante foi reservado e teve seu pH ajustado para 2,0 com uma solução de HCl 2,0 M. O sobrenadante acidificado foi deixado em repouso *overnight* a 4°C. No dia seguinte, foi realizada uma nova centrifugação repetindo as mesmas condições citadas anteriormente para a recuperação do biossurfactante. Após esse período, o sobrenadante foi descartado e o precipitado foi ressuspendido em 5,0 mL de água destilada, com seu pH ajustado para 7,0 com uma solução de NaOH 1,0 M (ARIMA, 1968; COOPER, 1981).

Posteriormente, foi realizada a extração líquido-líquido, onde foi adicionado o mesmo volume de uma mistura clorofórmio-metanol (2:1, v/v), nos tubos que continham o

precipitado. A solução passou por agitação em vórtex por 1 min e em seguida foi submetida a uma centrifugação a 2.500 rpm a 4°C durante 15 minutos para o processo de separação de fases. Após este processo, a fase orgânica foi separada e as amostras foram postas em uma capela de exaustão para que grande parte do solvente fosse evaporado. Após o repouso, as amostras foram filtradas para a quantificação dos lipopeptídeos por cromatografia líquida de alta eficiência (ROCHA, 2017; PAIVA, 2023).

QUANTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Para a quantificação e caracterização foi utilizada a metodologia de Cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) por meio do Cromatógrafo SPD-10AV VP, UV-VIS detector, Shimadzu (Shimadzu Corporation, Japão) equipado com coluna Shim-pack CLC-ODS (M)® (Shimadzu) de fase reversa C18 (250 x 4,5 mm, 100 Å, com partículas de 5 µm) com fase móvel a uma vazão de 1,0 mL/min a 30 ºC com composição de 80% acetonitrila e 20% ácido trifluoroacético 3,8 mM como descritos por Rocha (2017). A análise dos resultados foi realizada no software Microsoft Excel 11.1.

ATIVIDADE EMULSIFICANTE

Para determinar a atividade emulsificante, foi seguida a metodologia de Cirigliano e Carman (1984) com modificações. Em triplicata, foi feita uma proporção de 1:1:5 de amostra de surfactina com água pH 8,5, tampão acetato de sódio (0,1M a pH 3,6) e querosene comercial. Essa mistura foi agitada por 2 min e depois posta em repouso até a leitura da absorbância. As amostras foram lidas a 540 nm no espectrofotômetro (Thermo Spectronic - Genesys 10 UV, Estados Unidos) sendo utilizada a proporção anterior sem a amostra com surfactina como controle e água destilada como o branco.

Resultados e Discussões

PRODUÇÃO DE SURFACTINA E ITURINA

Por meio da análise por cromatografia líquida de alta eficiência foram identificados picos dos dois lipopeptídeos. Os picos de surfactina se destacaram, especialmente os que surgiram entre os tempos de 5,3-6,7 min. Os picos de iturina surgiram entre os tempos de 1,9-2,4 min. Utilizando a equação da reta, a concentração de ambos os biossurfactantes foram calculadas e tratadas no software Microsoft Excel 11.1 e estão representadas na tabela a seguir (Tabela 1).

Comparando as cepas por local de origem, pode-se perceber que houve variações, com uma das cepas reservadas do banco de microrganismos apresentando maior produção, cerca de duas vezes mais que a segunda maior produtora e onze vezes mais que a terceira maior produtora, ambas vindo de vários repiques anteriores. Os resultados apresentados corroboram com as pesquisas anteriormente realizadas por Rocha (2017) e Paiva (2023), onde se observa a diminuição na produção de surfactantes com o passar do tempo e a quantidade de repiques, sugerindo que estão passando pelo processo de

degeneração de culturas, o que pode diminuir a produção de metabólitos gerados pelos microrganismos.

ATIVIDADE EMULSIFICANTE

Seguindo o conceito de Cirigliano e Carmam (1984) que define atividade emulsificante como a quantidade de surfactante ou emulsificante capaz de aumentar a absorbância do controle em 1,0 u.a, foram realizados os ensaios para determinação desta propriedade. Os resultados obtidos e seus desvios padrões foram representados na Tabela 2 juntamente a Figura 3 e as concentrações de surfactina das amostras eram as mesmas representadas na Tabela 1.

Conforme os resultados obtidos e comparativamente às concentrações obtidas de surfactina, apenas três das cepas cumpriram o propósito de aumentar a absorbância da amostra e apenas durante o primeiro intervalo de repouso, apresentando variações na absorbância de 1,450 a 1,139, enquanto o controle apresentou absorbância de 0,02. As três cepas que obtiveram os resultados positivos foram as mesmas que apresentaram maior concentração de surfactina.

Conclusão

No presente trabalho foi possível aproveitar e reproduzir as condições de cultivo de baixo custo apresentadas por Rocha (2017) em todas as cepas de *Bacillus subtilis* manipuladas durante a pesquisa. Observou-se uma maior produtividade média de surfactina (12,1 mg/L) em uma das cepas proveniente do banco de microrganismos e que não havia passado pelo processo de reativação e repiques contínuos.

Adicionalmente, resultados de trabalhos anteriores que utilizaram as mesmas cepas evidenciaram uma queda brusca de produção da surfactina e iturina ao decorrer dos anos. Além disso, a iturina neste estudo não apresentou concentrações identificáveis. Estes resultados nos sugerem que as bactérias tenham passado pelo processo de degeneração de culturas, no qual diminuem significativamente a produção de compostos originários de seu próprio metabolismo. Diante disso, faz-se necessária a identificação dos fatores que podem estar contribuindo para esse processo, a fim de se buscar alternativas para se evitar este problema.

Em relação aos resultados da atividade emulsificante, pode-se considerar que as cepas que apresentaram maior concentração de surfactina obtiveram resultados satisfatórios em determinado intervalo de repouso. Contudo, a baixa concentração de biossurfactantes produzida pelos microrganismos foi um fator significante para valores abaixo do esperado e diminuição da atividade emulsificante.

Referências

ARIMA, Kei; KAKINUMA, Atsushi; TAMURA, Gakuzo. Surfactin, a crystalline peptides lipid surfactant produced by Bacillus subtilis: isolation, characterization and its inhibition of fibrin clot formation. Biochemical And Biophysical Research Communications, [S.L.], v. 31, n. 3, p. 488-494, maio 1968. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/0006-291x(68)90503-2.

CIRIGLIANO, M. C.; CARMAN, G. M. Isolation of a bioemulsifier from Candida lipolytica. Applied and Environmental Microbiology, v. 48, n. 4, p. 747–750, out. 1984.

COOPER, David G.; GOLDENBERG, Beena G. Surface-Active Agents from Two Bacillus Species. Applied and Environmental Microbiology, v. 53, n. 2, p. 224–229, fev. 1987.

DRAKONTIS, Constantina Eleni; AMIN, Samiul. Biosurfactants: Formulations, properties, and applications. Current Opinion in Colloid & Interface Science, v. 48, p. 77–90, ago. 2020.

HEILBRONNER, S. et al. The microbiome-shaping roles of bacteriocins. Nature Reviews Microbiology, v. 19, n. 11, p. 726–739, 1 nov. 2021.

LU, Z.; GUO, W.; LIU, C. Isolation, identification and characterization of novel Bacillus subtilis. Journal of Veterinary Medical Science, v. 80, n. 3, p. 427–433, mar. 2018.

NAGTODE, Vaishnavi S et al. Green Surfactants (Biosurfactants): A Petroleum-Free Substitute for Sustainability─Comparison, Applications, Market, and Future Prospects. ACS Omega, v. 8, n. 13, 24 mar. 2023.

PAIVA, Wilza Kimilly Vital de. Produção de surfactina por Bacillus subtilis UFPEDA 438 a partir de melaço de cana e avaliação de suas atividades biológicas incluindo a in silico frente ao SARS-CoV-2. Orientador: Everaldo Silvino dos Santos. 2023. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

PENG, Mengxue; LIANG, Zhihong. Degeneration of industrial bacteria caused by genetic instability. World Journal of Microbiology and Biotechnology, v. 36, n. 8, 18 jul. 2020.

REUSSER, Fritz. Stability and Degeneration of Microbial Cultures on Repeated Transfer. Advances in Applied Microbiology, p. 189–215, 1963.

ROCHA, Patrícia Maria. Produção de surfactina por Bacillus subtilis UFPEDA 438 utilizando melaço de cana como substrato. 2017. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

RODRIGUES, D. DOS S. et al. Flotação de minério willemítico usando Bacillus subtilis como depressor. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 21, p. e3046, 2024.

SILVA, Rita et al. Applications of Biosurfactants in the Petroleum Industry and the Remediation of Oil Spills. International Journal of Molecular Sciences, v. 15, n. 7, p. 12523–12542, 15 jul. 2014.

ZAJIC, J. E.; SEFFENS, William; PANCHAL, Chandra. Biosurfactants. Critical Reviews in Biotechnology, v. 1, n. 2, p. 87–107, jan. 1983.

ZHANG, Cheng et al. Chemical structure, properties and potential applications of surfactin, as well as advanced strategies for improving its microbial production. AIMS microbiology, v. 9, n. 2, p. 195–217, 1 jan. 2023.

Anexos



Figura 1 - Câmara de Neubauer e visualização da câmara no microscópio com objetiva de 40x.



Figura 2: Visualização de bacilos gram-positivos por meio da coloração de Gram.



Figura 3: Representação em gráfico da atividade emulsificante.



Tabela 1: Concentração média de surfactina e iturina.



Tabela 2: Atividade emulsificante das amostras e controle por tempo de repouso.

CÓDIGO: ET1193

AUTOR: JULIA YASMIN LEONEZ EUZEBIO

COAUTOR: THALITA QUEIROZ E SILVA

ORIENTADOR: MEYSAM MASHHADIKARIMI

TÍTULO: AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL E CRISTALOGRÁFICA DO AÇO MARAGING PRODUZIDO POR LPBF AO LONGO DA DIREÇÃO DE CONSTRUÇÃO

Resumo

A manufatura aditiva por fusão a laser em leito de pó (Laser Powder Bed Fusion - LPBF) submete o material a elevados gradientes térmicos e sucessivos ciclos de aquecimento e resfriamento, podendo gerar heterogeneidades microestruturais e cristalográficas. Este trabalho avaliou as variações microestruturais, cristalográficas e de microdureza do aço maraging (MS1) produzido por LPBF em cinco posições ao longo da direção de construção, utilizando microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX) e microdureza Vickers. As análises microestruturais evidenciaram uma microestrutura refinada, caracterizada pela sobreposição de poças de fusão e pela presença de estruturas celulares e alongadas em diferentes orientações. A análise por DRX confirmou a predominância da martensita α′, com fração volumétrica entre 81 e 100%, além de variações no tamanho de cristalito, entre 16,12 e 39,61 nm, e na microdeformação, entre 0,20 e 0,33%, bem como na densidade de discordâncias e no volume da célula unitária. Apesar das variações observadas, a microdureza manteve-se relativamente uniforme, variando entre 347 e 363 HV. Os resultados indicam que o processamento por LPBF promove variações locais na microestrutura e nos parâmetros cristalográficos ao longo da direção de construção, sem resultar em alterações expressivas na microdureza do material na condição como construída.

Palavras-chave: Aço maraging; Laser Powder Bed Fusion; Difração de Raios X.

TITLE: Microstructural and Crystallographic Evaluation of LPBF-Produced Maraging Steel Along the Build Direction

Abstract

Laser Powder Bed Fusion (LPBF) additive manufacturing subjects materials to high thermal gradients and successive heating and cooling cycles, which may lead to

microstructural and crystallographic heterogeneities relevant to high-performance structural applications. This study investigated the microstructural, crystallographic, and microhardness variations of LPBF-produced MS1 maraging steel at five different positions along the build direction using optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and Vickers microhardness measurements. The microstructural analyses revealed a refined microstructure characterized by overlapping melt pools and the presence of cellular and elongated structures with different orientations. XRD analysis confirmed the predominance of α′ martensite, with a volume fraction ranging from 81 to 100%, as well as variations in crystallite size, ranging from 16.12 to 39.61 nm, and microstrain, ranging from 0.20 to 0.33%, in addition to differences in dislocation density and unit cell volume among the evaluated positions. Despite the observed microstructural and crystallographic variations, the microhardness remained relatively uniform, ranging from 347 to 363 HV. The results indicate that the LPBF process promotes local variations in microstructure and crystallographic parameters along the build direction without resulting in significant changes in the microhardness of the material in the as-built condition.

Keywords: Maraging steel; Laser Powder Bed Fusion; X-ray diffraction

Introdução

A manufatura aditiva tem se destacado como uma alternativa promissora para a fabricação de componentes metálicos complexos, permitindo a produção camada por camada diretamente a partir de modelos tridimensionais computadorizados [1-3]. Entre as diferentes técnicas de manufatura aditiva metálica, a fusão seletiva a laser em leito de pó (LPBF) destaca-se pela elevada precisão geométrica, alta taxa de resfriamento e capacidade de produzir componentes com microestruturas refinadas e propriedades mecânicas superiores [4-6]. Além de proporcionar a redução de desperdícios de material e dos custos de pós-produção [1,4,7].Os aços maraging constituem uma classe especial de aços de ultra-alta resistência caracterizados pelo baixo teor de carbono e pelo endurecimento por precipitação de compostos intermetálicos em uma matriz martensítica [4,7-9]. Esses materiais apresentam uma combinação excepcional de elevada resistência mecânica, boa tenacidade à fratura, estabilidade dimensional e excelente soldabilidade [5,10-13]. Por essas razões, têm sido amplamente empregados nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, de defesa, ferramentaria e moldes de alta precisão [1,4,8,9,11,13,14], sendo seu principal mecanismo de fortalecimento associado à formação de precipitados intermetálicos nanométricos durante o tratamento de envelhecimento [2,7,14,15].

Tradicionalmente, os componentes de aço maraging são produzidos por rotas convencionais que envolvem múltiplas etapas de processamento, incluindo fusão, forjamento, laminação, usinagem, soldagem e tratamentos térmicos subsequentes, frequentemente associados a processos especiais de refusão, como VIM, VAR, ESR, visando garantir elevada pureza química e desempenho mecânico [5,7,13]. Embora essas técnicas permitam a obtenção de materiais com excelentes propriedades mecânicas, os processos convencionais apresentam elevada complexidade operacional e alto custo de fabricação [2,10,11]. Nesse cenário, os aços maraging mostram-se promissores para aplicação em LPBF devido às suas características metalúrgicas, como baixo teor de

carbono e boa soldabilidade, que contribuem para reduzir a formação de trincas e defeitos durante os rápidos ciclos térmicos do processo [5,6,16,17].

Diversos estudos recentes têm investigado os efeitos dos parâmetros de processamento em aços maraging produzidos por LPBF, especialmente em relação à densidade relativa, microestrutura e propriedades mecânicas [4,5,17,18]. Variáveis como potência do laser, velocidade de varredura e espessura de camada influenciam a formação de austenita retida, o refinamento microestrutural e o desempenho mecânico [1,5,18]. Além disso, os rápidos ciclos térmicos do processo podem gerar heterogeneidades microestruturais e cristalográficas ao longo da construção camada por camada [1,18].Nesse sentido, Shamsdini et al. [19] verificaram crescimento direcional de grãos e diferenças microestruturais entre regiões internas e superficiais em amostras de aço MS1, evidenciando heterogeneidades desenvolvidas durante a fabricação aditiva. Já Lyu et al. [20] associaram menores aportes de energia a estruturas celulares mais refinadas, menor fração de austenita retida e maior dureza no aço 18Ni-300, identificando também aumento progressivo de dureza ao longo da direção de construção, atribuído ao reaquecimento cíclico decorrente da deposição sucessiva das camadas.

Apesar desses avanços, ainda existem limitações na compreensão das alterações microestruturais e cristalográficas desenvolvidas ao longo da construção camada por camada em aços maraging processados por LPBF, especialmente por meio de técnicas de difração de raios X. Nesse contexto, torna-se relevante investigar a evolução microestrutural e cristalográfica do aço maraging MS1 produzido por LPBF, buscando compreender possíveis heterogeneidades desenvolvidas ao longo da direção de construção, contribuindo para o entendimento dos mecanismos associados ao processamento aditivo de ligas metálicas de alto desempenho.

Metodologia

2.1 Materiais e procedimento experimental

Esta seção descreve os materiais, métodos e instrumentos utilizados no desenvolvimento deste estudo. As experimentações foram conduzidas no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais - LCEM da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) em parceria com o Centro de Excelência em Manufatura Aditiva Marinha da Universidade de New Brunswick. O procedimento experimental utilizado neste trabalho é apresentado na Figura (1).

Figura 1 - Fluxograma detalhado das etapas de processamento e de caracterização experimental das amostras.

Fonte: autoria própria.

2.2 Fabricação das amostras LPBF

Foram utilizadas amostras de aço maraging MS1 produzidas pelo processo de manufatura aditiva por fusão a laser em leito de pó (Laser Powder Bed Fusion – LPBF). As amostras foram fabricadas utilizando parâmetros de potência do laser entre 285 e 305 W,

velocidade de varredura entre 960 e 1010 mm/s, espessura de camada entre 40 e 50 µm e espaçamento entre trilhas de 110 µm.

Após a fabricação, foi selecionada uma amostra com aproximadamente 10 cm de altura, da qual foram obtidos 5 segmentos distribuídos ao longo da direção de construção. O seccionamento foi realizado de modo a permitir a avaliação das possíveis alterações microestruturais e cristalográficas desenvolvidas ao longo da construção da peça. A composição química do pó de aço maraging MS1 utilizado na fabricação das amostras é apresentada na Tabela 1, e a representação esquemática do processo de fabricação das amostras pelo método LPBF é apresentada na Figura 2.

Tabela 1 - Composição química nominal (% em peso) do pó de aço maraging MS1.

Fonte: Elaborado a partir de informações fornecidas pelo fabricante.

Figura 2 - Representação esquemática da fabricação por LPBF

Fonte: autoria própria

2.3 Preparação das amostras

As amostras foram seccionadas em diferentes posições ao longo da direção de construção, de modo a permitir a comparação das características do material entre as regiões inferior, intermediária e superior da amostra. Após o seccionamento, as superfícies destinadas à caracterização foram submetidas a procedimentos de preparação metalográfica, incluindo embutimento, lixamento (lixas de 220-1200 mesh), polimento com suspensão diamantada (de 6 a 1 µm) e ataque químico (nital 5%). A preparação das superfícies teve como finalidade proporcionar condições adequadas para a realização das análises microestruturais e mecânicas, reduzindo a influência de irregularidades superficiais e de possíveis defeitos introduzidos durante o corte e a preparação.

2.4 Caracterização microestrutural

2.4.1 Microscopia Óptica (MO)

A caracterização por Microscopia Óptica (MO) foi realizada com o objetivo de avaliar as características microestruturais das diferentes regiões da amostra ao longo da direção de construção. Após a preparação metalográfica, as superfícies foram analisadas por microscopia óptica, permitindo observar aspectos gerais da microestrutura e possíveis diferenças entre as regiões avaliadas. As imagens obtidas nas diferentes posições da amostra foram comparadas qualitativamente, buscando identificar alterações na morfologia e na distribuição dos constituintes microestruturais associadas à posição ao longo da direção de construção.

2.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi empregada como técnica complementar à microscopia óptica, visando avaliar características morfológicas,

possíveis heterogeneidades microestruturais e aspectos relacionados às regiões de fusão desenvolvidas durante o processamento por LPBF, possibilitando uma análise mais detalhada da microestrutura do aço maraging. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura da marca ZEISS, modelo AURIGA 40, pertencente ao Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais (LCEM). Além das imagens obtidas, foram realizadas análises químicas locais por meio da técnica de espectroscopia de dispersão de energia (EDS) acoplada ao MEV, com o objetivo de auxiliar na identificação e distribuição química das fases presentes nas amostras analisadas.

2.5 Caracterização cristalográfica por Difração de Raios X (DRX)

As análises cristalográficas foram realizadas por Difração de Raios X (DRX), com o objetivo de identificar as fases presentes e avaliar possíveis alterações cristalográficas ao longo da direção de construção das amostras produzidas por LPBF. As medidas foram realizadas em um difratômetro da marca Shimadzu, modelo XRD7000, utilizando velocidade de varredura de 1° por minuto, passo de 0,02° e faixa angular de 20° a 100°.

Os difratogramas obtidos foram analisados com o auxílio do software X'Pert HighScore para a identificação das fases presentes em cada amostra. Posteriormente os difratogramas foram tratados utilizando o método de refinamento de Rietveld por meio do software MAUD, visando determinar parâmetros como tamanho de cristalito, microdeformação e parâmetros de rede. Adicionalmente, foi empregado o método de Williamson-Hall para avaliação dos parâmetros microestruturais associados às amostras analisadas.

2.6 Ensaio de microdureza Vickers

As medidas de microdureza foram efetuadas em todas as regiões analisadas das amostras produzidas por LPBF, com base na norma ISO 6507-1:2018. Para cada região da amostra, foram realizadas 5 indentações em cada região analisada, respeitando-se o espaçamento adequado entre as impressões e as bordas da amostra, sendo o resultado final obtido por meio da média dos valores medidos. No ensaio, foi utilizada uma carga de 500gf durante 10 segundos. As medidas de microdureza Vickers foram realizadas em um microdurômetro digital FM-810, da marca Future-Tech.

Resultados e Discussões

3.1. Evolução microestrutural do aço maraging LPBF

As micrografias ópticas e eletrônicas do aço maraging produzido por manufatura aditiva por fusão a laser em leito de pó (LPBF) são apresentadas na Figura 3. Nas imagens obtidas por microscopia óptica, observa-se uma microestrutura refinada e heterogênea, constituída por regiões alongadas e entrelaçadas, tanto nas regiões de topo quanto de base das amostras. Na seção lateral, observam-se estruturas curvas e aproximadamente semielípticas, associadas à sobreposição das poças de fusão formadas durante a passagem do feixe laser. Essa morfologia está relacionada à formação e à sobreposição das poças de fusão durante o processamento por LPBF [6,19,21].

Nas imagens de MEV em maior ampliação, observa-se uma estrutura de solidificação refinada, caracterizada pela presença de estruturas celulares e regiões alongadas, com diferentes orientações. Em determinadas regiões, as estruturas alongadas apresentam-se aproximadamente paralelas, enquanto outras apresentam morfologia mais equiaxial. A formação dessas estruturas está associada aos elevados gradientes térmicos e às altas taxas de resfriamento características do processo LPBF, que restringem o crescimento durante a solidificação e favorecem a formação de estruturas celulares refinadas [6,18].

A orientação das estruturas alongadas pode estar relacionada à direção de extração de calor durante a solidificação, uma vez que o fluxo de calor influencia a direção de crescimento das estruturas formadas na região da poça de fusão [18]. Além disso, as camadas previamente solidificadas são submetidas a sucessivos ciclos térmicos durante a deposição das camadas subsequentes, o que pode promover alterações locais na microestrutura ao longo da peça [6, 22].

Também são observadas pequenas descontinuidades pontuais nas imagens de MEV, que podem estar associadas à presença de poros. Entretanto, essas descontinuidades aparecem de forma localizada nas regiões analisadas, não sendo possível realizar uma avaliação quantitativa da porosidade apenas a partir das micrografias. A formação de poros durante o LPBF pode estar relacionada às condições de processamento e à dinâmica da poça de fusão, como instabilidades durante a fusão e o aprisionamento de gases [21]. De modo geral, as imagens evidenciam uma microestrutura refinada, resultante das condições de fusão e solidificação impostas durante o processamento por LPBF.

Figura 3- Micrografias ópticas (topo e base) e eletrônicas de varredura (lateral e ampliação) do aço maraging MS1, evidenciando a morfologia e as sobreposições das poças de fusão.

Fonte: Autoria própria

3.2 Análise da Estrutura cristalina

A Figura 4 apresenta os difratogramas de raios x das amostras de aço maraging produzidas por LPBF, obtidas em diferentes posições ao longo da peça. Observa-se que todas as amostras apresentaram como fase predominante a martensita α′, de estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), identificada principalmente pelos planos cristalográficos (110), (200), (211) e (220). Esse resultado está associado às elevadas taxas de resfriamento características do processo LPBF, que favorecem a formação da matriz martensítica[5,23]. Além da fase predominante, foram identificadas pequenas contribuições de fases secundárias em algumas amostras, incluindo austenita γ, Ti e compostos ricos em Al e Ni. A presença dessas fases pode estar relacionada à complexa história térmica característica do processo LPBF, uma vez que as camadas previamente depositadas são submetidas a sucessivos ciclos de reaquecimento durante a construção da peça[20,24]. Esses ciclos térmicos podem promover alterações microestruturais e, sob determinadas condições, favorecer a formação de fases secundárias e compostos intermetálicos ainda durante o processo de fabricação[25]. Dessa forma, a microestrutura obtida no estado as-built resulta da combinação entre a rápida solidificação, responsável pela formação predominante da matriz martensítica, e os

ciclos térmicos subsequentes experimentados pelo material durante a construção [23,24].

Figura 4-Difratogramas de raios X obtidos para as regiões de base e topo das amostras de aço maraging produzidas por LPBF.

Fonte: Autoria própria

A Figura 5 apresenta os parâmetros estruturais obtidos a partir da análise dos padrões de difração de raios X das diferentes regiões das amostras produzidas por LPBF. Na Figura 5a, observa-se que o pico correspondente ao plano (110) da martensita apresenta variações tanto na posição em 2θ quanto na largura à meia altura (FWHM) entre as regiões de topo e base. Essas alterações indicam diferenças no estado de distorção da rede cristalina e na microestrutura formada ao longo da construção. De modo geral, o deslocamento dos picos pode estar relacionado a variações no parâmetro de rede, enquanto o alargamento dos picos está associado à presença de microdeformações, à redução do tamanho de cristalito e à elevada densidade de defeitos cristalinos[26,27]. Essas características são frequentemente observadas em materiais produzidos por LPBF devido às elevadas taxas de aquecimento e resfriamento e aos sucessivos ciclos térmicos impostos durante a deposição das camadas [23,26,28].

Os resultados apresentados na Figura 5b mostram variações no tamanho de cristalito, na microdeformação e na densidade de discordâncias entre as diferentes regiões. O tamanho de cristalito variou aproximadamente entre 16,12 e 39,61 nm, enquanto a microdeformação apresentou valores entre 0,20 e 0,33%, com densidade de discordâncias da ordem de 10^{14} m^{-2}. Esses resultados evidenciam uma microestrutura refinada e com elevado nível de defeitos cristalinos, características associadas às elevadas taxas de resfriamento e aos sucessivos ciclos térmicos característicos do processo LPBF [27,29]

A fração volumétrica de martensita, apresentada na Figura 5c, permaneceu elevada em todas as amostras, variando entre aproximadamente 81 e 100%, confirmando a predominância da matriz martensítica identificada nos difratogramas. Resultados semelhantes foram relatados por Kürnsteiner e colaboradores [24] para aços maraging produzidos por manufatura aditiva, nos quais foi observada uma matriz predominantemente martensítica, acompanhada por variações na fração de austenita e pela presença de precipitados intermetálicos em função da composição e das condições de processamento[27,30]. As pequenas variações observadas no volume da célula unitária (Figura 5d), bem como nos demais parâmetros estruturais, indicam diferenças locais no estado da rede cristalina, possivelmente relacionadas à distinta história térmica experimentada pelas regiões de topo e base durante a fabricação[23].

Figura 5- Parâmetros estruturais obtidos via DRX: (a) perfil do pico (110) da martensita, (b) tamanho de cristalito e microdeformação, (c) fração volumétrica de martensita e (d) volume da célula unitária.

Fonte: Autoria própria

3.3 Propriedades mecânicas

A Figura 6 apresenta os valores médios de microdureza Vickers obtidos nas cinco posições analisadas ao longo da direção de construção. Observa-se que os valores de microdureza permaneceram relativamente próximos entre as diferentes regiões, variando aproximadamente entre 347 e 363 HV. Embora pequenas oscilações tenham sido observadas entre as amostras, não foi identificada uma variação expressiva da microdureza ao longo da direção de construção, especialmente considerando a dispersão dos resultados indicada pelas barras de erro.

A amostra A1 apresentou o menor valor médio de microdureza, enquanto A4 apresentou o maior valor. Entretanto, os valores obtidos para as demais regiões permaneceram dentro de uma faixa relativamente estreita, indicando uma resposta mecânica globalmente homogênea ao longo da altura da amostra. Esse comportamento sugere que, apesar das diferenças locais observadas nos parâmetros microestruturais e cristalográficos, essas variações não foram suficientes para provocar alterações significativas na microdureza do material.

A relativa uniformidade da microdureza pode estar associada à predominância da matriz martensítica ao longo de toda a amostra, conforme identificado na análise de difração de raios X. Os valores encontrados no presente trabalho mostraram-se similares aos reportados na literatura para o aço maraging M300 processado por LPBF no estado como construído, que atingiu valores de 360 ± 15 HV e 350 ± 15 HV nas direções horizontal e vertical, respectivamente [31].Essa proximidade reforça a consistência dos resultados obtidos, uma vez que ambos os materiais, ainda sem tratamento térmico de envelhecimento, apresentam matriz martensítica associada a níveis intermediários de dureza. Além disso, os sucessivos ciclos térmicos característicos do processo LPBF podem promover variações locais na microestrutura, sem necessariamente resultar em diferenças expressivas na propriedade mecânica global. Dessa forma, os resultados indicam que a resposta em microdureza se manteve relativamente estável ao longo da direção de construção.

Figura 6 - Perfil de microdureza Vickers (HV) ao longo da direção de construção das amostras.

Fonte: Autoria própria

Conclusão

O presente estudo permitiu avaliar as alterações microestruturais, cristalográficas e de microdureza ao longo da direção de construção do aço maraging MS1 produzido por Laser Powder Bed Fusion (LPBF). As análises microestruturais evidenciaram uma estrutura refinada e heterogênea, caracterizada pela sobreposição de poças de fusão e pela presença de estruturas celulares e alongadas com diferentes orientações.

A análise por difração de raios X confirmou a predominância da martensita α′ em todas as regiões avaliadas, com fração volumétrica entre aproximadamente 81 e 100%. Foram observadas variações no tamanho de cristalito, entre 16,12 e 39,61 nm, na

microdeformação, entre 0,20 e 0,33%, bem como na densidade de discordâncias e no volume da célula unitária. Esses resultados evidenciam a existência de heterogeneidades cristalográficas ao longo da direção de construção, associadas às diferentes condições térmicas experimentadas pelo material durante o processamento camada por camada.

Apesar dessas variações microestruturais e cristalográficas, a microdureza permaneceu relativamente uniforme ao longo da amostra, com valores entre 347 e 363 HV. Dessa forma, os resultados indicam que as heterogeneidades desenvolvidas durante o LPBF não foram suficientes para promover alterações expressivas na resposta mecânica avaliada por microdureza, mantendo-se a predominância da matriz martensítica ao longo da peça. Como continuidade do estudo, a realização de tratamentos térmicos de envelhecimento, a quantificação da porosidade e a análise da textura cristalográfica poderão contribuir para uma compreensão mais aprofundada da influência da direção de construção sobre o aço maraging produzido por LPBF.

Referências

[1] DEBROY, T. et al. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties. Progress in Materials Science, v. 92, p. 112–224, 2018. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.

[2] SAMEI, J. et al. A hybrid additively manufactured martensitic-maraging stainless steel with superior strength and corrosion resistance for plastic injection molding dies. Additive Manufacturing, v. 45, 102068, 2021. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102068.

[3] FARIAS, R. M.; VILARINHO, L. O. Simulações computacionais dos processos de manufatura aditiva de metais: um review introdutório. Soldagem & Inspeção, v. 27, e2703, 2022. DOI: 10.1590/0104-9224/SI27.03.

[4] SHAKERIN, S. et al. Additive manufacturing of maraging steel-H13 bimetals using laser powder bed fusion technique. Additive Manufacturing, v. 29, 100797, 2019. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100797.

[5] GUO, L. et al. Additive manufacturing of 18% nickel maraging steels: defect, structure and mechanical properties: a review. Journal of Materials Science & Technology, v. 120, p. 227–252, 2022. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.10.056.

[6] NONG, X. D. et al. A novel low-cost ultra-strong maraging steel by additive manufacturing. Materials Science and Engineering: A, v. 887, 145747, 2023. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145747.

[7] FONSECA, D. P. M. et al. A short review on ultra-high-strength maraging steels and future perspectives. Materials Research, v. 24, n. 1, e20200470, 2021. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2020-0470.

[8] SANJARI, M. et al. Microstructure, texture, and anisotropic mechanical behavior of selective laser melted maraging stainless steels. Materials Characterization, v. 192, 112185, 2022. DOI: 10.1016/j.matchar.2022.112185.

[9] LEK, Y. Z. et al. Additive manufacturing of corrosion-resistant maraging steel M789 by directed energy deposition. Materials Science and Engineering: A, v. 857, 144032, 2022. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144032.

[10] BAI, Y. et al. Microstructure and mechanical properties of additively manufactured multi-material component with maraging steel on CrMn steel. Materials Science and Engineering: A, v. 802, 140630, 2021. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140630.

[11] DEHGAHI, S. et al. Microstructural evolution and high strain rate compressive behavior of as-built and heat-treated additively manufactured maraging steels. Materials Science and Engineering: A, v. 815, 141183, 2021. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141183.

[12] BOUZAKIS, E. et al. Comparison of additively manufactured vs. conventional maraging steel in corrosion-fatigue performance after various surface treatments. Procedia CIRP, v. 87, p. 469–473, 2020. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.003.

[13] XU, S. et al. Effects of forging and heat treatment on martensite lath, recrystallization and mechanical properties evolution of 18Ni(250) maraging steel. Materials, v. 15, n. 13, 4600, 2022. DOI: 10.3390/ma15134600.

[14] XU, T. Z. et al. Development and characterization of a novel maraging steel fabricated by laser additive manufacturing. Materials Science and Engineering: A, v. 891, 145975, 2024. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145975.

[15] NOURI, N. et al. Characterization of phase transformation and strengthening mechanisms in a novel maraging steel produced using laser-based powder bed fusion. Materials Characterization, v. 207, 113522, 2024. DOI: 10.1016/j.matchar.2023.113522.

[16] WANG, B. et al. Investigation on the cracking resistances of different ageing treated 18Ni maraging steels. Materials Science and Engineering: A, v. 771, 138553, 2020. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138553.

[17] GU, D. et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing. Science, v. 372, n. 6545, eabg1487, 2021. DOI: 10.1126/science.abg1487.

[18] LI, H. et al. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel by additive manufacturing. Materials Science and Engineering: A, v. 915, 147201, 2024. DOI: 10.1016/j.msea.2024.147201.

[19] SHAMSDINI, S. A. R. et al. A trade-off between powder layer thickness and mechanical properties in additively manufactured maraging steels. Materials Science and Engineering: A, v. 776, 139041, 2020. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139041.

[20] LYU, T. et al. Melting mode driven tuning of local microstructure and hardness in laser powder bed fusion of 18Ni-300 maraging steel. Materialia, v. 35, 102113, 2024. DOI: 10.1016/j.mtla.2024.102113.

[21] OLIVEIRA, A. R.; JARDINI, A. L.; DEL CONTE, E. G. Effects of cutting parameters on roughness and residual stress of maraging steel specimens produced by additive manufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 111, p. 2449–2459, 2020. DOI: 10.1007/s00170-020-06309-3.

[22] BAI, Y. et al. Microstructure and machinability of selective laser melted high-strength maraging steel with heat treatment. Journal of Materials Processing Technology, v. 288, 116906, 2021. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116906.

[23] TAN, C. et al. Microstructural evolution, nanoprecipitation behavior and mechanical properties of selective laser melted high-performance grade 300 maraging steel. Materials & Design, v. 134, p. 23–34, 2017. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.08.026.

[24] KÜRNSTEINER, P. et al. Massive nanoprecipitation in an Fe-19Ni-xAl maraging steel triggered by the intrinsic heat treatment during laser metal deposition. Acta Materialia, v. 129, p. 52–60, 2017. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.02.069.

[25] AMIRABDOLLAHIAN, S. et al. Towards controlling intrinsic heat treatment of maraging steel during laser directed energy deposition. Scripta Materialia, v. 201, 113973, 2021. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2021.113973.

[26] BRYTAN, Z. et al. Microstructural and mechanical properties of novel Co-free maraging steel M789 prepared by additive manufacturing. Materials, v. 15, n. 5, 1734, 2022. DOI: 10.3390/ma15051734.

[27] SAJJADIVAND, S. et al. Accelerated age-hardening kinetics in additively manufactured 18Ni(300) maraging steel. Scientific Reports, v. 15, 35154, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-19047-x.

[28] SHAN, Z. et al. Efficient residual stress mitigation in additively manufactured 18Ni300 maraging steel. International Journal of Mechanical Sciences, v. 268, 109055, 2024. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2024.109055.

[29] TEKIN, T. et al. Effect of a direct aging heat treatment on the microstructure and the tensile properties of a 18Ni-300 maraging steel produced by Laser Powder Bed Fusion. Materials Science and Engineering: A, v. 872, 144921, 2023. DOI: 10.1016/j.msea.2023.144921.

[30] YIN, Y. et al. Laser additive manufacturing of steels. International Materials Reviews, v. 67, n. 5, p. 487–573, 2022. DOI: 10.1080/09506608.2021.1983351.

[31] KOLOMY, S. et al. Comparative analysis of machinability and microstructure in LPBF and conventionally processed M300 maraging steel. Scientific Reports, v. 15, 35980, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-19719-8.

Anexos



Figura 1 - Fluxograma detalhado das etapas de processamento e de caracterização experimental das amostras.



Figura 2 - Representação esquemática da fabricação por LPBF



Tabela 1 - Composição química nominal (% em peso) do pó de aço maraging MS1



Figura 3- Micrografias ópticas (topo e base) e eletrônicas de varredura (lateral e ampliação) do aço maraging MS1, evidenciando a morfologia e as sobreposições das poças de fusão.



Figura 4-Difratogramas de raios X obtidos para as regiões de base e topo das amostras de aço maraging produzidas por LPBF.



Figura 5- Parâmetros estruturais obtidos via DRX: (a) perfil do pico (110) da martensita, (b) tamanho de cristalito e microdeformação, (c) fração volumétrica de martensita e (d) volume da célula unitária.



Figura 6 - Perfil de microdureza Vickers (HV) ao longo da direção de construção das amostras.

CÓDIGO: ET1205

AUTOR: JOÃO ANTÔNIO PEDRO DIMITRI FARIAS MARTINS DE LIMA

ORIENTADOR: ADAILDO GOMES D ASSUNCAO

TÍTULO: Design e Análise de Antenas de Microfita Miniaturizadas Baseadas no Triângulo de Sierpinski

Resumo

Este artigo analisa a miniaturização de antenas através da aplicação da geometria fractal do Triângulo de
Sierpinski. Utilizando uma estrutura de alimentação em guia de onda coplanar (CPW), o estudo investiga a relação entre o
número de iterações fractais e a frequência de ressonância do dispositivo. As simulações, realizadas no software HFSS,
demonstram que o aumento da ordem da iteração provoca um decréscimo na frequência de ressonância a uma razão
constante de aproximadamente 0,76. Os resultados comprovam que a adoção do Triângulo de Sierpinski viabiliza a redução
espacial de antenas, mantendo a largura de banda constante, tornando-se uma solução previsível e eficiente para sistemas
de telecomunicações modernos.

Palavras-chave: Antenas Fractais; Miniaturização de Antenas; Triângulo de Sierpinski;

TITLE: Design and Analysis of Miniaturized Microstrip Antennas Based on theSierpinski Triangle

Abstract

This article analyzes antenna miniaturization through the application of the Sierpinski Triangle fractal geometry.
Using a coplanar waveguide (CPW) feed structure, the study investigates the relationship between the number of fractal
iterations and the device's resonant frequency. Simulations, performed using HFSS software, demonstrate that increasing
the iteration order causes a decrease in the resonant frequency at a constant rate of approximately 0.76. The results prove
that the adoption of the Sierpinski Triangle enables spatial reduction of antennas while

keeping the bandwidth constant,
making it a predictable and efficient solution for modern telecommunication systems.

Keywords: Fractal Antennas; Antenna Miniaturization; Sierpinski Triangle; CPW

Introdução

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de criar antenas miniaturizadas com comportamento multibanda e banda larga impulsiona a
adoção de técnicas de redução espacial[1-2]. As duas abordagens principais envolvem manipulação de materiais
(substratos de alta permissividade) e manipulação geométrica, como a inclusão de fendas e estruturas específicas.
Dentre as opções geométricas, os fractais se destacam como uma solução multifuncional. Sua aplicação não
apenas reduz o tamanho elétrico das antenas de forma eficaz, mas também possibilita o gerenciamento da
diretividade e a otimização das características espectrais e operacionais do dispositivo[3].

As geometrias fractais desenvolvidas pelo matemático polonês Sierpinski — como o Triângulo, o Tapete e
a Curva — oferecem a vantagem central de reduzir a frequência de ressonância de uma antena sem aumentar suas
dimensões físicas ou alterar as propriedades do seu substrato. O uso dessas variantes iterativas é validado por
estudos como [4], que analisam as perdas de transmissão e a redução de frequência. As iterações podem reduzir
a frequência em mais de 40% em comparação a patches quadrados, ao mesmo tempo em que gerenciam a
diretividade [5-6].

Este artigo tem como escopo analisar a redução da frequência de ressonância através de três sucessivas
iterações do Triângulo de Sierpinski, utilizando uma estrutura de alimentação em guia de onda coplanar (CPW).
Por meio de simulações no software HFSS, a pesquisa busca demonstrar a relação direta entre o número da
iteração fractal e as frequências de ressonância, evidenciando que a frequência decresce a uma razão constante
de 0,76 a cada nova iteração geométrica. Com isso, comprova-se que o uso dessas estruturas no design de antenas
viabiliza uma miniaturização mais previsível e eficiente.

Metodologia

2. FRACTAIS DE SIERPINSKI

A Figura 1 apresenta as geometrias dos fractais, Triangular (Figura 1-1), Curva (Figura 1-2) e o Tapete
(Figura 1-3).

A evolução fractal da antena segue um processo iterativo de subdivisão geométrica:
• N= 0: A estrutura tem início como um triângulo equilátero metálico e sólido.
• N= 1: Os pontos médios dos três lados do triângulo original são identificados e conectados, formando
um triângulo central invertido. Esta área central é então removida (vazada) do elemento irradiante.
• N = 2 ... ∞: O mesmo processo de subtração triangular é aplicado recursivamente a cada um dos
triângulos menores sólidos resultantes da iteração anterior.

A dimensão de Hausdorff quantifica a complexidade desta geometria [8]. Para o Triângulo de Sierpinski, a
cada iteração são gerados 3 novos triângulos menores, sendo que cada um possui a metade da base e altura do
triângulo do estágio anterior. Portanto, a dimensão fractal que rege o comportamento da antena proposta é
expressa por:

$$d = \ln(3)/\ln(2) = 1{,}585 \qquad (1)$$

O aumento dessa complexidade estrutural das bordas do patch, pautado por esse cálculo, é o que possibilita
a diminuição progressiva da frequência de operação a cada nova iteração adotada no projeto.

3. PROJETO DA ANTENA

Com base no Método da Linha de Transmissão [7] se projetou um patch triangular HFSS. As dimensões da
antena triangular usando CPW estão apresentadas na tabela 1. O substrato usado foi FR-4 com $\epsilon r = 4{,}4$.

Para reduzir a frequência de ressonância de uma antena de patch triangular, convencionalmente é necessário
aumentar o tamanho físico da antena ou elevar a permissividade do seu substrato[7]. Neste projeto, a antena de
patch triangular equilátera alimentada por CPW será modificada com base na primeira iteração da estrutura do
Triângulo de Sierpinski. O objetivo dessa modificação é manter a superfície de área do elemento irradiante quase
igual à superfície original do patch triangular base. A partir desta configuração, o comportamento do dispositivo
é analisado através do estudo das iterações subsequentes.

No Triângulo de Sierpinski o aumento das iterações provoca a diminuição da frequência de forma não-
linear, diferente do que ocorre na Curva de Sierpinski [4]. Desta forma na 2ª iteração (N=2) o fractal foi
optimizado via o software HFSS de forma a manter a razão entre as frequências de ressonância entre as iterações.
Utilizando um fator de assimetria a estrutura apresentou chanfros entre os triângulos internos, responsáveis por
modificar a distribuição de corrente na estrutura, assim ressoando na frequência desejada. A figura 2 apresenta
as três geometrias estudadas.

Resultados e Discussões

4. SIMULAÇÃO e RESULTADOS

As simulações numéricas foram conduzidas utilizando o software HFSS, baseado no Método dos Elementos Finitos
(FEM). O patch triangular base e as subsequentes iterações de Sierpinski foram modelados sobre um substrato
FR-4 utilizando uma porta de excitação em guia de onda coplanar (CPW). O intervalo de varredura de frequência
foi configurado de 1.0 GHz a 3.0 GHz para capturar os modos fundamentais de ressonância de todas as
configurações.

A Figura 4 ilustra o comportamento do coeficiente de reflexão (S11) para as três geometrias propostas.
Observa-se um evidente deslocamento das frequências de ressonância (fr) para bandas inferiores à medida que a
ordem da iteração (N) aumenta. O patch original (N = 0) ressoa em 2,5 GHz, enquanto a segunda iteração (N =
2) atinge o casamento de impedância em 1,45 GHz. Esse deslocamento comprova o alongamento dos percursos
das correntes superficiais provocados pelas fendas fractais, resultando em um tamanho elétrico maior sem a
necessidade de expansão da área física.

A Tabela 2 resume os dados para as diferentes iterações. O decaimento da frequência ocorre em uma razão
constante entre a iteração posterior (i+1) e a atual, conforme a equação 2. Esse valor é similar aos outros trabalhos
encontrados na literatura [4,9-13]. Quanto menor esse valor, mais agressiva é a miniaturização[13]. O valor
encontrado dessa redução está ligado a Dimensão de Hausdorff, a qual é especifica de cada fractal. A figura 5
mostra da distribuição de corrente de superfície em fr, as arestas internas do triângulo

são a região com maior
concentração de corrente conforme figura.

$$fr(N = i + 1) / fr(N = i) \approx 0{,}76 \qquad (2)$$

Conclusão

5. CONCLUSÃO

A análise do patch triangular alimentado por Guia de Onda Coplanar (CPW), modificado através das
sucessivas iterações do Triângulo de Sierpinski, evidenciou a eficácia da geometria fractal como uma técnica
robusta para a miniaturização de antenas. Os resultados simulados demonstraram que existe uma relação
previsível e direta entre o número da iteração (N) e o decréscimo da primeira frequência de ressonância do
dispositivo. Especificamente, observou-se que o aumento de N reduz a frequência a uma razão matemática
constante de aproximadamente 0,76 a cada nova iteração, confirmando a viabilidade de controlar o
comportamento espectral através do preenchimento estrutural do elemento radiante.

Constata-se que a substituição da área metálica contínua por fendas fractais — regida pela Dimensão de
Hausdorff — amplia o comprimento dos caminhos elétricos das correntes no patch. Esse fenômeno permite que
a antena ressoe em frequências significativamente menores (de 2.50 GHz para 1.45 GHz, entre N=0 e N=2) sem
que haja expansão das suas dimensões físicas originais ou necessidade de utilização de substratos de maior
permissividade dielétrica. Em suma, o uso da geometria do Triângulo de Sierpinski revela-se uma estratégia
eficiente e previsível para o desenvolvimento de sistemas de telecomunicações compactos e modernos.

Referências

[1] A. J. S, R. M. V, and A. Jayaprakash, “Compact Multiband Fractal Antenna Design with Circular and Triangular Geometries for
Higher Frequency Wireless Systems,” 2025 1st International Conference on Radio Frequency Communication and Networks
(RFCoN), pp. 1–6, Jun. 2025, doi.org/10.1109/rfcon62306.2025.
[2]S. Singhal and A. K. Singh, “CPW-fed hexagonal Sierpinski super wideband fractal antenna, ” IET Microwaves, Antennas &
Propagation, vol. 10, no. 15, pp. 1701–1707, Dec. 2016, doi.org/10.1049/iet-map.2016.

[3]Singh, Rajdeep, Amandeep Singh Sappal, and Amandeep Singh Bhandari. "Efficient design of sierpinski fractal antenna for high
frequency applications." International Journal of Engineering Research and Applications 4 (2014): 44-48.
[4] A. Reha, A. El Amri, and M. Bouchouirbat, “The Behavior of CPW-Fed Sierpinski Curve Fractal Antenna,” Journal of
Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, vol. 17, no. 3, pp. 366–372, Sep. 2018,
doi.org/10.1590/2179-10742018.
[5] J. Anguera, C. Puente, C. Borja, R. Montero, and J. Soler, “Small and high-directivity bow-tie patch antenna based on the
Sierpinski fractal,” Microwave and Optical Technology Letters, vol. 31, no. 3, pp. 239–241, Sep. 2001, doi.org/10.1002/mop.1407.
[6] Figueredo, R. E. ; Vicentine, G. F. ; Dionizio Júnior, J. M. ; Medeiros, L. P. G. C. ; Barbosa, D. S. ; Pinto, M. A. B. ; Alexandria, A.
R. ; Perotoni, M. B. ; Justo, J. F. ; Nurhayati, N. ; Oliveira, A. M. . Desenvolvimento de uma Antena Vivaldi Antipodal com Cavidades
Laterais Utilizando Fractal de Sierpinski Para Melhoramento dos Parâmetros de Radiação. In: Workshop de Micro-ondas (WMO), 2021,
Cubatão, SP. Workshop de Micro-ondas (WMO), 2021. v. 1. p. 18-19.
[7] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 4ª Ed. John Wiley & Sons Inc. 2016.
[8] H. Sagan, Space-filling curves. New York (NY): Springer, 1994.
[9] M. Tarbouch, A. El Amri, H. Terchoune, and O. Barrou, “A compact microstrip patch antenna based on fractal geometry on the
ground plane,” 2018 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), pp. 1–8, Apr.
2018, doi.org/10.1109/commnet.2018.
[10] M. Tarbouch, A. El Amri, and H. Terchoune, “Compact CPW-Fed microstrip octagonal patch antenna with H slot for WLAN and
WIMAX applications,” 2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), pp. 1–
6, Apr. 2017, doi.org/10.1109/wits.2017.7934638.
[11] D.-C. Chang, B.-H. Zeng, and J.-C. Liu, “CPW-Fed Circular Fractal Slot Antenna Design for Dual-Band Applications,” IEEE
Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no. 12, pp. 3630–3636, Dec. 2008, doi.org/10.1109/tap.2008.2007279.
[12] K. J. Vinoy, J. K. Abraham, and V. K. Varadan, “On the relationship between fractal dimension and the performance of multi-
resonant dipole antennas using koch curves,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 9, pp. 2296–2303, Sep.
2003, doi.org/10.1109/tap.2003.816352.
[13] N. Sharma, G. P. Singh, and V. Sharma, “Miniaturization of fractal antenna using novel Giuseppe peano geometry for wireless
applications,” 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES),
Jul. 2016, doi.org/10.1109/icpeices.2016.7853633.

Anexos



Figura 1-1 – Triângulo de Sierpinski



Figura 1-2 – Curva de Sierpinski



Figura 1-3 – Tapete de Sierpinski



Tabela 1 – Dimensões do Triângulo de Sierpinski com CPW



Figura 2 - Geometria do Triângulo de Sierpinski com CPW



Figura 3 - Três iterações do Triângulo de Sierpinski com CPW



Figura 4 - S11 simulado para as três iterações no Triângulo de Sierpinsk



Tabela 2 - Resultados da simulação



Figura 5 - Distribuição de corrente no fractal triangular de Sierpinski

CÓDIGO: ET1212

AUTOR: LUCAS GABRIEL GALDINO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: ANA CECILIA VIEIRA DA NOBREGA

TÍTULO: Estudo do desempenho de superplastificantes em sistemas cimentícios com baixos teores de clínquer destinados à poços CCUS

Resumo

Este estudo avaliou o desempenho reológico de pastas cimentícias de baixo teor de clínquer destinadas a poços de petróleo em projetos de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS). Foram empregadas formulações binárias de cimento Portland Classe G e metacaulim, nas densidades de 15,8 e 14,2 lb/gal (relações água/cimento de 41% e 61%, respectivamente). Avaliaram-se dois dispersantes, A e B, nas temperaturas de 27 °C e 52 °C. Os materiais foram caracterizados por fluorescência de raios X e picnometria a gás hélio. O preparo, condicionamento e ensaios reológicos seguiram a ABNT NBR 9831 (2020), determinando-se consistência atmosférica, géis inicial e final, limite de escoamento e viscosidade plástica. A relação água/aglomerante foi o fator de maior influência no comportamento reológico, com a pasta de 14,2 lb/gal apresentando menores parâmetros em todas as condições. O aumento da temperatura também reduziu as propriedades reológicas, com maior impacto ao empregar o dispersante B. Este apresentou maior capacidade de redução dos parâmetros, especialmente na formulação de 15,8 lb/gal. Os resultados indicam que a seleção adequada de superplastificantes contribui para o controle reológico de pastas com menor disponibilidade de água e reduzido teor de clínquer, favorecendo sua aplicação em sistemas com argila calcinada.

Palavras-chave: Superplastificante. CCUS. Poços de Petróleo. Reologia. Clínquer.

TITLE: Performance Study of Superplasticizers in Low-Clinker Cementitious Systems for CCUS Wells

Abstract

This study evaluated the rheological performance of low-clinker cement slurries intended for oil wells in carbon capture, utilization, and storage (CCUS) projects. Binary formulations of Class G Portland cement and metakaolin were used at densities of 15.8 and 14.2 lb/gal (water-to-cement ratios of 41% and 61%, respectively). Two dispersants, A and B, were evaluated at temperatures of 27 °C and 52 °C. The materials were characterized by X-ray fluorescence and helium gas pycnometry. Preparation,

conditioning, and rheological testing followed ABNT NBR 9831 (2020), determining atmospheric consistency, initial and final gel strengths, yield stress, and plastic viscosity. The water-to-binder ratio was the most influential factor on rheological behavior, with the 14.2 lb/gal slurry exhibiting lower parameters across all conditions. Increasing temperature also reduced rheological properties, with a greater impact when using dispersant B. Dispersant B demonstrated a higher capacity to reduce the evaluated parameters, particularly in the 15.8 lb/gal formulation. The results indicate that the appropriate selection of superplasticizers contributes to the rheological control of slurries with lower water availability and reduced clinker content, favoring their application in systems containing calcined clay.

Keywords: Superplasticizer. CCUS. Oil Wells. Rheology. Clinker.

Introdução

A crescente demanda por soluções tecnológicas voltadas à mitigação das emissões de gases de efeito estufa tem impulsionado, como exemplo, o desenvolvimento de projetos de captura, utilização e armazenamento de carbono (Carbon Capture, Utilization and Storage – CCUS) (ABID; BAENA VELÁSQUEZ; TEODORIU, 2024; ALSUBAIH *et al.*, 2025; MAHMOUD; GAJBHIYE, 2026). Dentre as estratégias empregadas, o armazenamento geológico de dióxido de carbono (CO_2) em reservatórios profundos tem se destacado como alternativa promissora para redução das emissões industriais, exigindo elevados níveis de segurança operacional e integridade dos poços ao longo do tempo (HAKUZWEYEZU *et al.*, 2025). Nesse contexto, os sistemas de cimentação desempenham papel fundamental, tornando relevante a avaliação de materiais e formulações capazes de atender às exigências dessa aplicação.

Apesar de sua importância para a cimentação dos poços, a utilização de materiais cimentícios convencionais apresenta também um desafio relacionado às emissões associadas à produção do cimento, uma vez que a produção do clínquer, principal produto intermediário da fabricação do cimento Portland, é responsável por aproximadamente 90% das emissões de gases de efeito estufa da indústria do cimento, representando até 8% da liberação antropogênica de dióxido de carbono na atmosfera (NHUCHHEN; SIT; LAYZELL, 2021), tornando necessária a redução de seu teor na matriz cimentícia.

Nesse contexto, a utilização de materiais cimentícios suplementares, como as argilas calcinadas, apresenta-se como uma estratégia para a substituição parcial do clínquer. Entre as alternativas desenvolvidas para esse propósito, destaca-se o LC^3 (Limestone Calcined Clay Cement), uma formulação composta por clínquer, argila calcinada e filler calcário, apresentando potencial de redução das emissões de CO_2. Em uma formulação de LC^3, Gonnon e Lootens (2023) demonstraram uma redução da pegada de carbono de até 40% em relação a pastas convencionais puras, associada à redução do teor de clínquer em até 50%.

Embora o LC^3 apresente potencial como estratégia de redução do teor de clínquer, sua composição envolve a combinação de três componentes principais. Como alternativa, o presente estudo emprega uma formulação binária composta por cimento Classe G — composto predominantemente por clínquer — e argila calcinada, buscando avaliar o potencial de substituição parcial do clínquer nesse sistema. A inclusão de aditivos

superplastificantes é empregada como estratégia para o controle das propriedades reológicas da pasta, uma vez que a argila calcinada pode modificar seu comportamento em razão de características como elevada área superficial e capacidade de interação com a água.

Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento reológico dessas pastas binárias, submetidas a diferentes relações água/aglomerante, temperaturas e dispersantes, buscando determinar a influência dessas variáveis sobre os parâmetros reológicos das formulações.

Metodologia

Os materiais utilizados nesta pesquisa, incluindo o Cimento Portland classe G de alta resistência a sulfatos (CPG ARS) e o metacaulim foram caracterizados quanto à densidade, composição química e perda ao fogo, conforme apresentado na Tabela 1. O cimento classe G, é classificado segundo a API (American Petroleum Institute) Specification 10A, e utilizado em ampla faixa de profundidades, permitindo o ajuste de suas propriedades físico-químicas mediante a incorporação de aditivos. Enquanto o metacaulim, uma argila calcinada é amplamente utilizada como material cimentício suplementar, com característica pozolânica.

Tabela 1 - Caracterização físico-química do cimento Classe G e do metacaulim

Como pode ser observado na Tabela 1 o cimento Classe G apresenta densidade igual a 3,17 g/cm3 e predominância de óxido de cálcio (CaO), enquanto o metacaulim apresenta menor densidade, 2,64 g/cm3e características associadas à sua atividade pozolânica, como elevados teores de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3).

Foram desenvolvidas duas formulações contendo a mesma proporção de cimento Classe G e argila calcinada, como demonstrado na Tabela 2, diferenciando-se pela relação água/aglomerante de 41% e 61%, correspondentes às densidades de 15,8 lb/gal e 14,2 lb/gal, respectivamente.

Tabela 2 - Composição percentual e em massa das pastas estudadas

Foi adotada uma mesma concentração de dispersante para todas as formulações, de modo a possibilitar a avaliação de sua influência sobre o comportamento reológico de cada composição. Para a metodologia do estudo, foram utilizados equipamentos de precisão destinados à caracterização físico-química dos insumos iniciais.

Para a determinação da composição química, foi utilizado um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (FRX), mais especificamente um BRUKER CTX-800, onde o material, devidamente preparado, é submetido à incidência de raios X, promovendo a emissão de radiação característica dos elementos presentes. A partir da intensidade dessa radiação, foram determinados os teores dos principais óxidos constituintes de cada material, como CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, SO_3 e K_2O, expressos em porcentagem

de massa. Para a obtenção da massa específica real de cada material, foi utilizado um Picnômetro a Gás Hélio, onde uma massa conhecida da amostra é colocada em uma câmara de volume conhecido, na qual o hélio é introduzido sob condições controladas. Como o gás apresenta elevada capacidade de penetração em pequenos espaços e baixa reatividade, o volume efetivamente ocupado pelas partículas pode ser determinado a partir da variação de pressão, sem riscos de contaminação do material. Com a relação entre a massa da amostra e seu volume, obtém-se a massa específica das partículas, expressa em lb/gal.

A picnometria a gás hélio é uma técnica fortemente utilizada para a determinação da densidade verdadeira de materiais sólidos devido a sua precisão e por não ser destrutiva. Conforme abordado por Khalil et al. (2022).

As pastas foram preparadas tendo como referência os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 9831 (2020). Inicialmente os insumos foram devidamente pesados e separados de acordo com as proporções estabelecidas para cada formulação, em sequência misturados mecanicamente durante 1 min e 30 s, com o objetivo de alcançar a homogeneidade. A água de mistura, também devidamente pesada, foi combinada com sua concentração de aditivo superplastificante, seguindo a quantidade, em massa, específica de cada formulação num mixer, Ofite Constant Speed Blender. Em seguida, a blenda – mistura dos componentes sólidos - foi adicionada a água aditivada, e batida no mixer conforme os parâmetros de velocidade e tempo estabelecidos pela norma, a 4.000 rpm durante 15 s, seguida de agitação a 12.000 rpm durante 35 s. O procedimento foi repetido em todas as formulações avaliadas.

Após a preparação, a pasta foi imediatamente transferida para o consistômetro atmosférico, Chandler Model-1200, - aplicado o procedimento de aquecimento controlado para as formulações que não atendiam a temperatura ambiente – onde foi devidamente condicionada para poder ser realizado os ensaios reológicos.

Após o condicionamento, a pasta foi de imediato transferida para um viscosímetro rotativo de cilindros coaxiais, Chandler 875-3500, utilizando da configuração padrão, R1B1. O procedimento utiliza diferentes velocidades de rotação para obter a relação entre tensão e taxa de cisalhamento. As formulações foram ensaiadas em velocidades progressivas de 3 rpm a 300 rpm, com anotação da leitura após 10 s em cada rotação, depois repetido regressivamente, de 300 rpm a 3 rpm, sob o mesmo intervalo de tempo. Para os ensaios realizados a 52 °C, o sistema foi previamente aquecido e mantido na temperatura de ensaio. Os géis inicial e final foram determinados a partir das máximas deflexões registradas a 3 rpm após períodos de repouso de 10 s e 10 min, respectivamente.

Resultados e Discussões

Os ensaios reológicos forneceram os valores de consistência atmosférica, gel inicial e final, limite de escoamento e viscosidade plástica para as diferentes formulações e temperaturas avaliadas. Os resultados obtidos com os dispersantes A e B são apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 - Resultados da Reologia com Dispersante A

Conforme apresentado na Tabela 3, torna-se evidente o impacto da relação água/aglomerante nas pastas cimentícias. Uma vez que a pasta 15,8 lb/gal, apresenta um fator água 20 pontos percentuais inferior, correspondendo a uma redução relativa de 32,8% comparado a pasta 14,2 lb/gal e apresentou características reológicas significativamente maiores em temperaturas iguais e com o mesmo aditivo. Essa diferença evidencia a influência da disponibilidade de água sobre o comportamento das pastas. Esse efeito é particularmente relevante para sistemas contendo argila calcinada, uma vez que sua elevada área superficial pode aumentar a demanda de água da mistura, alterando a quantidade de água disponível para promover a mobilidade das partículas.

A temperatura também demonstrou influência sobre as propriedades reológicas das pastas, embora a magnitude desse efeito tenha sido, em geral, inferior à observada para a relação água/aglomerante e para o tipo de dispersante. É notório sua interação quando comparamos uma mesma formulação, com um mesmo dispersante, a 27°C e a 52°C.

Tabela 4 – Resultados da Reologia com Dispersante B

A influência da relação água/aglomerante não foi observada exclusivamente nas formulações com o dispersante A, sendo também verificada naquelas contendo o dispersante B, sendo particularmente mais expressiva no limite de escoamento e na viscosidade plástica, como apresentado na Tabela 4. A temperatura nesse sistema, também apresentou mais forte participação, quando comparada às formulações com o dispersante A. Para a pasta de 15,8 lb/gal, o aumento de 27 °C para 52 °C promoveu redução de 40% no parâmetro, enquanto, sob as mesmas condições, a redução observada com o dispersante A foi de apenas 7,4%.

Fica evidente, também, o fator de poder do dispersante B nas formulações. Onde o superplastificante consegue produzir, na pasta mais concentrada, a 52°C, um comportamento, em alguns parâmetros, relativamente semelhante ao da pasta mais diluída com dispersante A e temperatura ambiente. Como os géis final e inicial e viscosidade plástica.

A seguir, na Figura 1, são apresentados os gráficos elaborados para facilitar a comparação dos parâmetros reológicos das pastas em função da temperatura e do tipo de dispersante.

Figura 1 – Gráficos dos resultados reológicos em cada formulação

Observa-se, inicialmente, que a pasta de 15,8 lb/gal apresentou valores superiores aos da pasta de 14,2 lb/gal para todos os parâmetros avaliados, independentemente do dispersante e da temperatura empregados. Fica melhor evidenciado, também, os pontos anteriormente discutidos, como os efeitos da relação água/aglomerante e temperatura em cada uma das formulações. Com destaque para a eficiência do dispersante B, apresentando inclinações mais abruptas principalmente no limite de escoamento e viscosidade plástica.

Conclusão

A pasta 14,2 lb/gal, com maior fator água, demonstrou os menores parâmetros reológicos, esse comportamento evidencia a influência da menor concentração de partículas, graças à maior quantidade de diluente. Essa relação que demonstrou ser o fator de maior influência sobre o comportamento reológico. Ficando evidente quando comparamos com a pasta 15,8 lb/gal, com menor fator, demonstrando a maior resistência ao escoamento. Enquanto o dispersante B demonstrou potencial para atenuar esse princípio.

Embora a pasta de 15,8 lb/gal tenha apresentado maiores valores reológicos, também demonstrou maior sensibilidade às alterações nas condições de ensaio, especialmente quanto à temperatura e ao tipo de dispersante. A utilização do dispersante B, associada ao aumento da temperatura para 52°C, promoveu reduções mais expressivas em determinados parâmetros, indicando que a resposta reológica da pasta mais concentrada é mais dependente das condições de dispersão e temperatura.

Logo, evidencia-se o potencial que o uso de superplastificantes, em condições ideais, tem sob formulações com baixa disponibilidade de água. Como é o caso com formulações mistas com argilas calcinadas. A seleção adequada do dispersante apresenta-se como uma alternativa para o controle reológico de formulações com menor relação água/aglomerante, sem depender exclusivamente do aumento do teor de água.

Referências

ABID, K.; BAENA VELÁSQUEZ, R. M.; TEODORIU, C. Well integrity and cementing challenges in carbon capture, utilization, and storage (CCUS) applications: A comprehensive review. Geoenergy Science and Engineering, 2024.

ALSUBAIH, A. *et al*. Material selection and long-term wellbore integrity for geological CO2 storage: Recent developments and future prospects. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9831: Cimento Portland para poços - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

GONNON, Pascal; LOOTENS, Didier. A Model Linking Compressive Strength and Porosity in Ternary System: Metakaolin, Limestone, Cement. Minerals, 2023.

HAKUZWEYEZU, J. *et al*. Risk assessment and operational safety of CO2 geological storage in deep depleted reservoirs and saline aquifers. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2025.

KHALIL, A. *et al*. Determination of True Density of Solid Materials Using Helium Pycnometry. Journal of Materials Science, 2022.

MAHMOUD, M.; GAJBHIYE, R. Evaluation of cement degradation and integrity in deep geological CO2 storage wells. SPE Drilling & Completion, 2026.

NHUCHHEN, Daya R.; SIT, Song P.; LAYZELL, David B. Alternative fuels co-fired with natural gas in the pre-calciner of a cement plant: Energy and material flows. Science Direct, 2021.

Anexos



Tabela 1 - Caracterização físico-química do cimento Classe G e do metacaulim



Tabela 2 - Composição percentual e em massa das pastas estudadas



Tabela 3 - Resultados da Reologia com Dispersante A



Tabela 4 – Resultados da Reologia com Dispersante B



Figura 1 – Gráficos dos resultados reológicos em cada formulação

CÓDIGO: ET1254

AUTOR: ADRIANO IGHOR MOURA SOARES

ORIENTADOR: ISABEL CRISTINA DE OLIVEIRA MAGALHAES AMORIM

TÍTULO: EDUCAÇÃO PARA O TRÂNSITO E EDUCAÇÃO AMBIENTAL EM PROJETOS POLÍTICO-PEDAGÓGICOS: POTENCIALIDADES E FRAGILIDADES EM UMA ANÁLISE COMPARATIVA

Resumo

A educação para o trânsito e a educação ambiental constituem dimensões relevantes da formação escolar para a promoção de hábitos sustentáveis e de uma mobilidade mais segura. Este artigo compara os Projetos Político-Pedagógicos (PPPs) de duas instituições públicas da educação básica da Região Metropolitana de Natal, RN, uma municipal e outra federal, com o objetivo de identificar potencialidades e fragilidades na abordagem dessas temáticas. A pesquisa caracteriza-se como estudo de casos múltiplos, de abordagem qualitativa, com análise documental comparativa dos PPPs, orientada por dez requisitos legais utilizados como eixos analíticos. Os resultados evidenciam uma diferença entre as duas dimensões analisadas. Enquanto a educação ambiental apresenta diferentes formas de institucionalização nos dois documentos, a educação para o trânsito não encontra previsão formal em nenhum dos PPPs. A comparação também revela potencialidades complementares, com maior institucionalização da dimensão ambiental em um documento e maior abertura metodológica e interdisciplinar no outro. Conclui-se que a ausência compartilhada da educação para o trânsito constitui a principal fragilidade dos dois PPPs e evidencia a necessidade de sua incorporação formal ao planejamento pedagógico, de modo articulado ao currículo e às práticas educativas.

Palavras-chave: Educação ambiental. Educação para o trânsito. Educação básica.

TITLE: TRAFFIC EDUCATION AND ENVIRONMENTAL EDUCATION IN POLITICAL-PEDAGOGICAL PROJECTS: POTENTIALS AND FRAGILITIES IN A COMPARATIVE ANALYSIS

Abstract

Traffic education and environmental education are relevant dimensions of school education for the promotion of sustainable habits and safer mobility. This article compares the Political-Pedagogical Projects (PPPs) of two public basic education

institutions in the Metropolitan Region of Natal, Brazil, one municipal and one federal, aiming to identify potentials and weaknesses in the treatment of these themes. The study is characterized as a qualitative multiple-case study based on comparative documentary analysis of the PPPs, guided by ten legal requirements used as analytical lenses. The results reveal differences between the two dimensions analyzed. While environmental education presents different forms of institutionalization in the two documents, traffic education is not formally addressed in either PPP. The comparison also reveals complementary strengths, with greater institutionalization of the environmental dimension in one document and greater methodological openness and interdisciplinarity in the other. It is concluded that the shared absence of traffic education constitutes the main weakness of both PPPs and highlights the need to formally incorporate this theme into pedagogical planning, in articulation with the curriculum and educational practices.

Keywords: Environmental education. Traffic education. Basic education.

Introdução

A educação constitui uma dimensão relevante para a formação de comportamentos e valores associados à segurança viária (Trillos-Pacheco; Cuello Lazcano, 2020). No campo da mobilidade, ela não se restringe aos condutores, mas alcança também passageiros e pedestres, o que contribui para um sistema viário mais seguro (Trillos-Pacheco; Cuello Lazcano, 2020). Esse processo deve se iniciar na infância, etapa em que os hábitos e comportamentos relacionados à mobilidade ainda estão em formação (Magalhães, 2025). Santos et al. (2025) destacam a educação para o trânsito como um componente contínuo e essencial na construção de um sistema seguro de trânsito, e não como uma iniciativa isolada. Esse entendimento é especialmente relevante diante dos impactos associados aos transportes. O setor responde por parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa e de CO_2 (Emodi et al., 2022), enquanto a poluição atmosférica, a inatividade física e os sinistros de trânsito produzem efeitos relevantes sobre a saúde pública (Nieuwenhuijsen, 2020).

No Brasil, essa realidade se reflete de forma particularmente grave entre crianças e adolescentes, pois os acidentes de trânsito permanecem entre as principais causas de morte acidental na faixa de 5 a 14 anos (Criança Segura Brasil, 2020), apesar da existência de amplo amparo normativo sobre o tema (Freire, 2020). Esse respaldo, contudo, não se traduz necessariamente em ampla inserção da educação para o trânsito no ambiente escolar. As experiências desenvolvidas com crianças ainda representam uma parcela limitada da produção científica (Santos et al., 2025). Nesse contexto, a temática encontra respaldo em um conjunto de normas que envolve a Constituição Federal (Brasil, 1988), a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (Brasil, 1996), o Código de Trânsito Brasileiro (Brasil, 1997), a Política Nacional de Educação Ambiental (Brasil, 1999) e a Base Nacional Comum Curricular (Brasil, 2017). A partir desse arcabouço, Melo et al. (2026) sistematizam dez requisitos relacionados à educação ambiental e à educação para o trânsito, os quais permitem analisar sua inserção em documentos e práticas pedagógicas.

Nesse contexto, destaca-se o Projeto Político-Pedagógico (PPP), que organiza as diretrizes pedagógicas de cada instituição de ensino e constitui, segundo a Lei de

Diretrizes e Bases da Educação Nacional (Brasil, 1996), um importante instrumento para sua formalização. A esse respeito, Soares e Magalhães (2026), ao analisarem os PPPs e as práticas pedagógicas de duas instituições de educação básica da Região Metropolitana de Natal, RN, identificam diferenças na forma como a educação ambiental e a educação para o trânsito são contempladas. A educação ambiental apresenta maior respaldo institucional e curricular nas escolas analisadas, enquanto a educação para o trânsito permanece associada a iniciativas pontuais, sustentadas por parcerias externas e sem vínculo institucional consistente. Esse resultado indica uma fragilidade na institucionalização da educação para o trânsito e levanta a necessidade de compreender de que forma essa lacuna se expressa nos próprios PPPs.

Diante disso, este artigo tem como objetivo comparar os PPPs de duas instituições quanto ao tratamento da educação ambiental e da educação para o trânsito, com o propósito de identificar potencialidades e fragilidades de cada documento e verificar em que medida as disposições de um PPP podem servir de referência para o aprimoramento do outro. Além desta introdução, o artigo está organizado em três seções. A metodologia descreve os procedimentos de comparação documental adotados; os resultados e a discussão apresentam a comparação entre os dois PPPs a partir dos eixos analíticos derivados dos requisitos legais; e as conclusões reúnem as proposições de alteração aos documentos.

Metodologia

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de casos múltiplos, de abordagem qualitativa, orientado à comparação direta entre os Projetos Político-Pedagógicos (PPPs) de duas instituições da educação básica da rede pública da Região Metropolitana de Natal/RN. Uma instituição corresponde a uma Escola Pública Municipal (EPM) e a outra, a uma Escola Pública Federal (EPF). A seleção das duas instituições decorreu da disponibilidade de acesso aos documentos. Foram enviados e-mails a 76 instituições de ensino com solicitação de acesso aos respectivos PPPs em versão vigente. Entre as instituições contatadas, apenas a EPM e a EPF responderam e cederam, por meio de suas coordenações pedagógicas, os respectivos PPPs em versão vigente. Assim, ainda que a amostragem tenha sido guiada pela acessibilidade, e não por um critério de representatividade estatística, o contraste de rede resultante, uma municipal e uma federal, oferece variação relevante quanto à natureza do vínculo institucional de cada escola.

O procedimento central consistiu no exame documental dos dois PPPs. A análise foi orientada pelos dez requisitos legais sistematizados por Melo et al. (2026), que consolidam exigências normativas e da literatura científica relacionadas à educação ambiental e à educação para o trânsito. Neste artigo, os requisitos não funcionam como critérios de verificação de conformidade, mas como categorias analíticas que orientam a leitura comparativa dos dois documentos. Cada requisito organiza a atenção da análise para um aspecto específico da institucionalização, ou da ausência de institucionalização, da educação ambiental e da educação para o trânsito em cada PPP.

Para cada requisito, a análise contrapôs diretamente o tratamento dado pela EPM e pela EPF, com atenção às diferenças de abordagem, às fragilidades compartilhadas e aos aspectos nos quais um documento pode oferecer referências para o aprimoramento do outro. Essas diferenças são também interpretadas à luz dos ODS (ONU, 2015), e a análise não estabelece uma hierarquia geral entre as instituições, pois reconhece, para cada requisito, as contribuições e limitações presentes nos dois documentos.

Resultados e Discussões

A comparação entre os dois PPPs, orientada pelos dez requisitos de Melo et al. (2026), revela um padrão distinto entre as duas dimensões analisadas. Na dimensão do trânsito, os dois documentos convergem de forma absoluta, pois nenhum dos dez requisitos encontra menção ou previsão relacionada à educação para o trânsito em nenhum dos dois PPPs. Essa omissão contrasta com o papel esperado da escola na promoção de ações que fortaleçam o aprendizado e a reflexão sobre segurança viária desde a educação infantil (Serra do Ramalho, 2020). Na dimensão ambiental, entretanto, os documentos divergem quanto ao modo como os requisitos se manifestam.

Souza et al. (2017) destacam que a efetividade da educação ambiental em contexto escolar depende da integração formal de ações ao PPP no momento de sua revisão, da adoção de abordagens interdisciplinares e participativas e do envolvimento de toda a comunidade escolar, como professores, alunos e famílias, em uma relação de corresponsabilidade. No PPP da EPM, a maior parte dos requisitos aplicáveis a essa dimensão, como a integração aos projetos pedagógicos, a interdisciplinaridade curricular, a abordagem participativa e dialógica, o engajamento familiar, as parcerias institucionais, a qualificação docente e o alinhamento com a Agenda 2030, aparece ancorada em mecanismos institucionais nomeados no texto. A continuidade e a progressividade desde a educação infantil, entretanto, dependem de um vínculo externo recorrente, mas não garantido internamente pelo documento. No PPP da EPF, a interdisciplinaridade curricular e a abordagem participativa e dialógica encontram respaldo estrutural na metodologia adotada pela escola. Já a integração aos projetos pedagógicos, a continuidade desde a educação infantil e o engajamento familiar aparecem de forma contingente, dependentes do interesse eventual de cada turma. As parcerias institucionais, a qualificação docente e o alinhamento com a Agenda 2030, por sua vez, não encontram nomeação explícita no texto.

Em ambos os documentos, portanto, parte das práticas de educação ambiental depende de condições que não estão plenamente institucionalizadas nos PPPs. No caso da EPM, essa dependência está associada principalmente a vínculos externos recorrentes, enquanto, na EPF, relaciona-se ao interesse eventual das turmas. Esse padrão é consistente com o que a literatura internacional identifica como uma das causas da fragmentação da educação ambiental na prática pedagógica. A formação docente insuficiente, a ausência de orientações metodológicas claras e as barreiras institucionais tendem a restringir essas iniciativas a ações pontuais e descontínuas (Gomes, 2014; Amézquita-Galindo; Salgado, 2025).

3.1 Ausência da educação para o trânsito nos dois PPPs

Os dois PPPs apresentam a mesma lacuna em relação à educação para o trânsito, sem diferenças entre as instituições quanto à presença dos requisitos analisados. Esse resultado indica que a ausência do tema não parece estar relacionada às particularidades de uma instituição específica. O PPP da EPM, apesar de nomear projetos ambientais concretos e parcerias externas, não apresenta mecanismo equivalente para a educação para o trânsito em nenhum dos trechos analisados. O PPP da EPF, por sua vez, embora se sustente em uma metodologia interdisciplinar, também não reserva ao trânsito qualquer espaço, seja como conteúdo obrigatório, seja como possibilidade prevista na metodologia Tema de Pesquisa. Essa ausência adquire relevância particular diante do que estabelece o Código de Trânsito Brasileiro (CTB - Brasil, 1997), em que o art. 76 determina que a educação para o trânsito seja promovida desde a pré-escola, por meio de ações coordenadas entre os órgãos do Sistema Nacional de Trânsito e de Educação. Essa etapa corresponde à educação infantil oferecida pelas duas instituições analisadas.

Além disso, essa lacuna compartilhada tem implicação direta sobre o ODS 4, que prevê a aquisição de competências para estilos de vida sustentáveis e para a promoção de uma cultura de paz, e sobre o ODS 11, que trata do acesso a sistemas de transporte seguros com atenção específica a crianças (ONU, 2015), dois objetivos aos quais a educação para o trânsito responde diretamente e que, em nenhum dos dois PPPs, encontram correspondência textual. A ausência do tema, portanto, não constitui apenas uma fragilidade pedagógica a corrigir isoladamente em um dos documentos, mas evidencia uma lacuna documental diante de uma exigência legal aplicável às duas instituições.

3.2 Diferentes mecanismos de inserção da educação ambiental

Nos requisitos em que a dimensão ambiental aparece com continuidade e articulação curricular, a diferença entre os dois PPPs decorre menos da qualidade da proposta pedagógica e mais da natureza do mecanismo que sustenta essa continuidade. O PPP da EPM ancora a educação ambiental em um projeto nomeado, o "Recompondo aprendizagens integrando 6Rs: Repensar, Reduzir, Reutilizar, Reciclar, Recusar e Replanejar", e em um vínculo institucional externo, a rede de Escolas Associadas da UNESCO, que impõe um eixo temático a cada ano. Ainda que esse eixo mude anualmente, a própria existência da rede garante que algum conteúdo ambiental apareça de forma recorrente, o que distingue esse mecanismo de continuidade de uma ausência de tratamento contínuo do tema nesse documento. Essa distinção é relevante porque a continuidade não constitui apenas uma característica pedagógica desejável, mas um princípio previsto na própria Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB - Brasil, 1996), que trata a educação como processo contínuo, reforçado pelas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCN - Brasil, 2013) ao determinarem que as etapas da educação básica devem estar interligadas e planejadas de forma articulada, assegurando desenvolvimento gradual.

O PPP da EPF, por sua vez, ancora a educação ambiental na metodologia Tema de Pesquisa, que a proposta pedagógica descreve como intrinsecamente interdisciplinar e transversal. O requisito de interdisciplinaridade curricular aparece de forma estrutural nesse documento, resultado que se destaca mesmo em comparação ao PPP da EPM nesse ponto específico, porque a Rede Temática torna a interdisciplinaridade uma característica constitutiva da metodologia, não dependente de um projeto anual único. Essa exigência de transversalidade tem base na própria trajetória da educação ambiental no currículo brasileiro, que desde os Parâmetros Curriculares Nacionais é tratada como

tema transversal, e não como disciplina específica, dada a natureza do ambiente como objeto comum a diferentes áreas do conhecimento (Gomes, 2014). A fragilidade da EPF aparece em outro lugar, na garantia de que um tema em particular, ambiental ou de trânsito, será de fato escolhido por alguma turma em algum momento do ciclo. O Tema de Pesquisa depende do interesse manifestado pelas crianças, sem qualquer instância externa que assegure a recorrência de um assunto específico. A dependência da iniciativa individual do professor ou do interesse eventual da turma, mesmo em currículos formalmente interdisciplinares, é um padrão também identificado entre docentes mexicanos, cuja ausência de orientação curricular explícita sobre como e quando abordar a temática ambiental leva a um tratamento oportunista e superficial do tema (Benavides Lahnstein; Paredes Chi, 2022).

Essa diferença de mecanismo é relevante também para o ODS 4, cuja meta de qualidade educacional pressupõe currículos que garantam competências mínimas a todos os estudantes, independentemente do interesse eventual de uma turma (ONU, 2015). Esse é o ponto em que o PPP da EPM oferece uma referência concreta ao da EPF, não a metodologia interdisciplinar em si, que a EPF já domina, mas o mecanismo de ancoragem externa que retira do interesse eventual das turmas a decisão sobre se um tema legalmente exigido será ou não trabalhado em determinado ano.

3.3 Diferenças na institucionalização de parcerias, formação docente e sustentabilidade

A divergência mais acentuada entre os dois PPPs aparece nos requisitos de parcerias institucionais, qualificação docente e alinhamento com diretrizes globais de sustentabilidade. Nesses três requisitos, o PPP da EPM nomeia explicitamente os vínculos institucionais correspondentes, enquanto o PPP da EPF não nomeia nenhum deles, ainda que descreva estruturas capazes de sustentá-los. A diferença não está na existência de estrutura institucional, a EPF descreve programas de pesquisa e extensão consolidados, como o PRONEI-PESQ e grupos certificados pela CAPES, mas na ausência de nomeação. Nenhum desses programas é vinculado explicitamente, no texto do PPP, à educação ambiental ou à educação para o trânsito. O único trecho em que um conteúdo ambiental aparece de fato, um eixo sobre meio ambiente e oceanos dentro da Rede Temática de um projeto cujo tema central era outro, corresponde a uma iniciativa de sala de aula, não a uma parceria institucional nomeada no documento. Essa distinção importa em particular para o ODS 17 (ONU, 2015), voltado ao fortalecimento de parcerias, porque uma estrutura institucional de pesquisa e extensão, por mais consolidada que seja, só cumpre esse papel quando nomeia explicitamente o objeto da parceria.

O mesmo padrão se repete no requisito de qualificação docente. O PPP da EPM vincula a formação continuada de professores à BNCC, e a BNCC, por sua vez, nomeia a consciência socioambiental entre suas competências gerais, o que permite considerar a dimensão ambiental coberta por essa cadeia de referências. O PPP da EPF também se apoia na BNCC, mas apenas para estruturar os campos de experiência e componentes curriculares trabalhados com as crianças, nunca como base declarada da formação docente. A BNCC está presente nos dois documentos, mas cumpre funções distintas em cada um, e é essa diferença de função, não a presença ou ausência do documento normativo, que explica o contraste entre os dois PPPs nesse requisito. Essa lacuna de nomeação na formação docente é relevante porque a literatura sobre formação inicial de professores indica que o compromisso dos futuros docentes com práticas de educação

ambiental depende diretamente de terem vivenciado, durante sua própria formação, experiências pedagógicas orientadas para esse fim, e não apenas do domínio teórico do tema (Linhares; Reis, 2022).

No requisito de alinhamento com a Agenda 2030, o mesmo mecanismo se repete uma última vez, o PPP da EPM nomeia a Agenda 2030 indiretamente por meio da parceria com a UNESCO e do eixo "Cidadania Global", enquanto o PPP da EPF não cita a Agenda 2030 nem os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável em nenhum trecho, apesar de a proposta pedagógica dialogar implicitamente com princípios de cidadania e sustentabilidade.

3.4 Contribuições e lacunas de cada PPP

A comparação direta permite isolar, para cada PPP, o que já está consolidado e poderia ser transferido ao outro documento. Do PPP da EPM, a EPF poderia incorporar o modelo de nomeação explícita, vincular formalmente parcerias já existentes, formação docente já ofertada e diretrizes globais já dialogadas implicitamente a um texto que as declare, sem necessariamente criar novos programas. Do PPP da EPF, a EPM poderia incorporar a lógica da Rede Temática como estrutura para pensar a interdisciplinaridade de temas ainda não trabalhados, entre eles o trânsito, de forma menos dependente de um projeto anual único.

Nenhum dos dois documentos, no entanto, oferece ao outro um modelo consolidado para a educação para o trânsito, uma vez que essa dimensão não é contemplada em nenhum dos PPPs. A ausência compartilhada evidencia uma lacuna comum aos dois documentos, distinta das diferenças identificadas na dimensão ambiental e relevante para os ODS 3, 4 e 11.

Conclusão

A comparação entre os dois PPPs, orientada pelos dez requisitos legais como eixos analíticos, revela um resultado central. A educação para o trânsito constitui uma lacuna comum às duas instituições, enquanto a educação ambiental se institucionaliza por caminhos distintos em cada documento. A fragilidade da educação para o trânsito, evidenciada pela análise documental dos dois PPPs, manifesta-se na ausência da temática nesses documentos, importantes instrumentos para a formalização das diretrizes pedagógicas das instituições de ensino (Brasil, 1996).

A diferença entre os dois PPPs quanto à dimensão ambiental está associada aos mecanismos que sustentam a continuidade e a nomeação dos temas trabalhados. No PPP da EPM, o vínculo com a rede de Escolas Associadas da UNESCO impõe um eixo temático anual e nomeia explicitamente parcerias, formação docente e diretrizes globais de sustentabilidade. No PPP da EPF, a metodologia Tema de Pesquisa garante interdisciplinaridade estrutural, mas depende do interesse eventual de cada turma para determinar se um tema específico será de fato trabalhado, e as estruturas institucionais

de pesquisa e extensão existentes na escola não aparecem nomeadas em vínculo com a educação ambiental ou para o trânsito.

Dessa comparação derivam proposições de alteração distintas para cada documento. Ao PPP da EPF, recomenda-se a incorporação de um mecanismo de nomeação explícita, que vincule formalmente ao currículo os programas de pesquisa e extensão já existentes na escola, a formação docente já ofertada e as diretrizes globais de sustentabilidade já presentes de modo implícito na proposta pedagógica. Essa nomeação formal, contudo, é condição necessária juntamente com a integração dialógica entre os agentes envolvidos e a superação de resistências curriculares, fatores que Gomes (2014) identifica como determinantes da efetividade formativa em projetos de parceria entre universidade e escola voltados à educação ambiental. Ao PPP da EPM, recomenda-se a incorporação da lógica da Rede Temática como estrutura complementar à rede PEA/UNESCO, capaz de ampliar a interdisciplinaridade para temas ainda não contemplados pelo eixo anual imposto externamente.

Para os dois documentos, a principal recomendação decorre da lacuna comum identificada na dimensão do trânsito. Recomenda-se, portanto, a construção de um mecanismo próprio de institucionalização da educação para o trânsito, articulado ao currículo desde a educação infantil e apoiado em parcerias externas explicitamente nomeadas no texto, com base no dispositivo já empregado pela EPM para a dimensão ambiental.

Como sugestão para pesquisas futuras, aponta-se a necessidade de estudos que comparem PPPs de um número maior de instituições da Região Metropolitana de Natal, a fim de verificar se o padrão identificado se repete em outras redes, além da análise de redes que já incorporaram a educação para o trânsito ao currículo, como referência para a superação da lacuna identificada.

Referências

AMÉZQUITA-GALINDO, S. L.; SALGADO, N. L. Assessment of teachers' knowledge, attitudes, and practices in environmental education in a medium-sized Colombian city. Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, v. 21, n. 9, p. e2690, 2025. DOI: https://doi.org/10.29333/ejmste/16768.

BENAVIDES LAHNSTEIN, A. I.; PAREDES CHI, A. A. Nociones interdisciplinarias sobre educación ambiental de docentes de primaria en Nuevo León. Perfiles Educativos, v. 44, n. 177, p. 113-129, 2022. DOI: 10.22201/iisue.24486167e.2022.177.60476.

CRIANÇA SEGURA BRASIL. Relatório Criança Segura 2020. [S. l.], 2020. Disponível em: https://criancasegura.org.br/wp-content/uploads/2021/03/Relatorio-Crianca-Segura-2020.pdf. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, DF: Ministério da Educação, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/mec/pt-br/cne/pdf/base-nacional-comum-

curricular-bncc/anexo-2013-texto-bncc-versao-aprovada-em-15-de-dezembro-de-2017. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Senado Federal, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 dez. 1996. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Brasília, DF, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9503compilado.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Brasília, DF, 1999. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9795.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Ministério da Educação; Secretaria de Educação Básica; Secretaria de Educação Continuada, Alfabetização, Diversidade e Inclusão; Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica. Conselho Nacional de Educação; Câmara de Educação Básica. Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica. Brasília: MEC; SEB; DICEI, 2013.

EMODI, N. V.; OKEREKE, C.; ABAM, F. I.; DIEMUODEKE, O. E.; OWEBOR, K.; NNAMANI, U. A. Transport sector decarbonisation in the Global South: a systematic literature review. Energy Strategy Reviews, v. 43, p. 100925, 2022. DOI: 10.1016/j.esr.2022.100925.

FREIRE, L. F. Uma sequência didática para trabalhar a educação para o trânsito. 2020. 103 f. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências e Matemática) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/1423. Acesso em: 29 ago. 2026.

GOMES, M. de F. V. B. Formação continuada de professores: reflexões a partir de experiências em projetos de educação ambiental. Currículo sem Fronteiras, v. 14, n. 1, p. 62-75, jan./abr. 2014.

LINHARES, E.; REIS, P. Práticas de cidadania ambiental na formação inicial de professores de educação básica: um estudo de caso. Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado, v. 97, n. 36.1, p. 163-184, 2022. DOI: 10.47553/rifop.v97i36.1.92499.

MAGALHÃES, I. Basic education and sustainability: an exploratory analysis of training for sustainable transport habits. Transportes, v. 33, p. e3058, 2025. DOI: 10.58922/transportes.v33.e3058.

MELO, A. B. F.; SOARES, A. I. M.; MAGALHÃES, I. Educational requirements for the promotion of sustainable mobility in developing countries. SSRN, 2026. DOI: 10.2139/ssrn.6993257.

NIEUWENHUIJSEN, M. J. Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities: a review of the current evidence. Environment International, v. 140, p. 105661, 2020. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105661.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015: Agenda 2030. New York: United Nations, 2015. Disponível em: https://docs.un.org/en/A/RES/70/1. Acesso em: 29 ago. 2026.

SANTOS, A. M. dos; LIMA, J. V.; FURTADO, L.; GONÇALVES, L.; SILVA, C. F. A. da. Traffic Education with a Focus on Experiences in Basic Education: A Global Literature Review. Latin American Transport Studies, v. 3, p. 100035, 2025. DOI: 10.1016/j.latran.2025.100035.

SERRA DO RAMALHO. Referencial Curricular Municipal para Educação Infantil e Ensino Fundamental de Serra do Ramalho. Serra do Ramalho, BA: Secretaria Municipal de Educação, 2020. Disponível em: https://serradoramalho.net/wp-content/uploads/2021/09/REFERENCIAL-CURRICULAR-SERRA-DO-RAMALHO.pdf. Acesso em: 29 ago. 2026.

SOARES, A. I. M.; MAGALHÃES, I. Inserção da educação para o trânsito e ambiental em projetos político-pedagógicos e em práticas pedagógicas na educação básica. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 40., 2026, Búzios. Anais do 40º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Búzios, RJ: ANPET, 2026.

SOUZA, A. S.; GOMES, A. C. L.; SIMÕES, S. S.; GARVÃO, R. F. Escola verde: Uma proposta para o ensino sustentável em São Miguel do Guamá/PA, Amazônia, Brasil. Revista Espacios, [S. l.], v. 38, n. 45, 2017.

TRILLOS-PACHECO, J. J.; CUELLO LAZCANO, M. C. Gestión de la comunicación y cultura vial en instituciones educativas de Barranquilla. Revista Venezolana de Gerencia, v. 25, n. 89, p. 106-129, 2020. DOI: 10.37960/revista.v25i89.31382.

CÓDIGO: ET1269

AUTOR: VITOR LESSA CEULEMANS

ORIENTADOR: BISMARCK LUIZ SILVA

TÍTULO: Avaliação microestrutural e mecânica da liga Sn-9Zn-0,2Ag como alternativa para soldas isentas de chumbo

Resumo

Ligas metálicas livres de chumbo têm recebido crescente atenção devido às restrições ambientais impostas ao uso de materiais contendo Pb, especialmente em soldas para componentes eletrônicos. Nesse contexto, ligas à base de Sn-Zn surgem como alternativas promissoras por apresentarem baixo custo e propriedades mecânicas adequadas, embora desafios como molhabilidade e formação de fases intermetálicas ainda limitem sua aplicação. Estudos indicam que a adição de prata (Ag) pode modificar positivamente a microestrutura e as propriedades de interface, tais como a resistência ao cisalhamento, a molhabilidade (capacidade de espalhamento sobre o substrato), a formação controlada de compostos intermetálicos (IMCs) que atuam como barreira difusional e o refinamento microestrutural da fase rica em Zn. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de um baixo teor de prata (0,2% em peso) na macroestrutura, microestrutura, parâmetros térmicos, macrossegregação e microdureza na liga eutética Sn-9%Zn solidificada em regime transitório de fluxo de calor. A caracterização foi realizada por Microscopia Óptica, Fluorescência de Raios X, Microscópio Eletrônico de Varredura e Microdurômetro Vickers. Os resultados preliminares indicaram uma microestrutura celular refinada, com aumento dos espaçamentos celulares e redução dos parâmetros térmicos ao longo do lingote, além de perfis de macrossegregação distintos para Zn e Ag, os quais serão mais explorados e discutidos detalhadamente

Palavras-chave: Liga Sn-Zn; Solidificação; Microestrutura; Parâmetros Térmicos.

TITLE: Microstructural and mechanical evaluation of the Sn-9Zn-0.2Ag alloy as an alternative for lead-free solders.

Abstract

Lead-free metallic alloys have received growing attention due to the environmental restrictions imposed on the use of Pb-containing materials, especially in solders for electronic components. In this context, Sn-Zn-based alloys emerge as promising alternatives due to their low cost and suitable mechanical properties, although challenges such as wettability and the formation of intermetallic phases still limit their application. Studies indicate that the addition of silver (Ag) can positively modify the

microstructure and interface properties, such as shear strength, wettability (spreading capacity on the substrate), the controlled formation of intermetallic compounds (IMCs) that act as a diffusion barrier, and the microstructural refinement of the Zn-rich phase. In this context, the present study aimed to evaluate the effect of a low silver content (0.2 wt.%) on the macrostructure, microstructure, thermal parameters, macrosegregation, and microhardness of the Sn-9%Zn eutectic alloy solidified under a transient heat flow regime. Characterization was performed using Optical Microscopy, X-Ray Fluorescence, Scanning Electron Microscopy, and a Vickers Microhardness Tester. Preliminary results indicated a refined cellular microstructure, with increasing cell spacings and decreasing thermal parameters along the ingot, in addition to distinct macrosegregation profiles for Zn and Ag, which will be further explored and discussed in detail in the subsequent sections of this report.

Keywords: Sn-Zn alloy; Solidification; Microstructure; Thermal parameters.

Introdução

A adição de prata (Ag) às ligas Sn-Zn tem se consolidado como uma estratégia eficaz para mitigar as deficiências do sistema binário [13, 14]. A literatura demonstra que a prata atua como um agente modificador da microestrutura, influenciando diretamente as propriedades da solda [10, 3]. A formação de compostos intermetálicos (IMCs) de Ag-Zn na camada interfacial previne o descolamento da junta, elevando a resistência ao cisalhamento [1]. O refinamento microestrutural promovido pela prata é um dos seus efeitos mais benéficos, convertendo a morfologia acicular (agulhas) da fase rica em zinco, que pode ser prejudicial à ductilidade, em uma estrutura mais fina e globular [10, 3]. A adição de Ag à liga Sn-9Zn resulta no refinamento da microestrutura eutética e na melhoria das propriedades de tração [10]. Estudos de solidificação indicam que a prata altera o comportamento de resfriamento da liga, promovendo uma distribuição mais homogênea das fases [11]. Além disso, a melhoria da molhabilidade é outro ponto crítico: quando o teor de Ag é inferior a 0,5% em peso, há uma notável melhora na capacidade de espalhamento da solda sobre o substrato de cobre, atribuída à maior resistência à oxidação proporcionada pelo elemento [3]. Teores controlados de Ag também melhoram as propriedades de molhagem da liga Sn-8.5Zn, reduzindo o ângulo de contato sobre substrato de cobre [4]. A formação de fases intermetálicas na interface solda/substrato é fortemente influenciada pela presença da prata, sendo que a camada de $AgZn_3$ atua como barreira difusional, inibindo o crescimento excessivo de IMCs indesejáveis e contribuindo para a confiabilidade da junta soldada [5, 14]. Adicionalmente, estudos mostram que a adição de Ag melhora a resistência à oxidação da liga fundida, reduzindo a formação de escória durante o processo de soldagem [3, 4, 13]. Para este estudo, a liga base escolhida foi a eutética Sn-9%Zn, por representar o melhor equilíbrio entre ponto de fusão reduzido e boas propriedades mecânicas, servindo como a matriz fundamental para o desenvolvimento de novas composições [7, 8, 10]. A prata foi adicionada no teor de 0,2% em peso, uma concentração estrategicamente baixa que se situa abaixo do limiar de solubilidade [2, 3]. Esta escolha é justificada pela necessidade de maximizar os benefícios do refinamento microestrutural e da melhoria da molhabilidade, minimizando ao mesmo tempo a formação de compostos intermetálicos Ag-Zn em larga escala (como $AgZn_3$ e Ag_5Zn_8) [2, 3, 5], que tendem a se tornar proeminentes em teores acima de 0,3% Ag [2, 3] e podem comprometer a tenacidade da junta [1, 3]. A literatura confirma que mesmo

baixos teores de prata, como 0,2% ou 0,3%, são suficientes para refinar a microestrutura e melhorar as propriedades da liga [2, 3, 10], sendo uma abordagem economicamente vantajosa por reduzir o custo final do material, dado que a prata é um metal de alto valor agregado [7, 12].

Metodologia

2.1. Simulações Termodinâmicas Para as simulações termodinâmicas da liga Sn-9%Zn-0,2%Ag, utilizou-se o software Thermo-Calc®, versão 2021a e base de dados TCSLD3. Com os resultados obtidos nestas simulações busca-se entender o caminho da solidificação, as temperaturas de transformação e limites de solubilidade. Estas simulações contaram com apoio do grupo de pesquisa Microstrutura e Propriedades em Processos de Solidificação (M2PS) do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar, na pessoa do seu coordenador, o Prof. Dr. José Eduardo Spinelli. 2.2. Obtenção da Liga e Solidificação Direcional A liga Sn-9%Zn-0,2%Ag (em peso) foi preparada a partir de metais puros (Sn, Zn e Ag) com pureza mínima de 99,9%, fundidos em um cadinho de carbeto de silício (SiC) inserido em um forno tipo mufla com temperatura máxima de 1200 °C. As quantidades dos elementos foram calculadas para atingir a composição nominal desejada. Após a fusão homogênea, o metal líquido foi vertido em um conjunto lingoteira–chapa-molde–termopares, e a solidificação foi iniciada. Utilizou-se um dispositivo de solidificação unidirecional vertical ascendente, amplamente reportado na literatura especializada (Silva et al., 2020; Ramos et al., 2022). O sistema de aquecimento do forno de solidificação direcional foi acionado e a liga fundida foi mantida dentro do dispositivo. Quando a temperatura atingiu um superaquecimento de 10% acima da temperatura liquidus (TL) da liga, a solidificação direcional foi iniciada pelo acionamento de um jato de água fria na parte inferior da chapa-molde. Dessa forma, a solidificação desenvolveu-se verticalmente, de baixo para cima, de modo direcional. 2.3. Aquisição dos parâmetros térmicos Nove termopares tipo J foram inseridos em diferentes posições ao longo da lingoteira (distanciadas da interface metal/molde) para monitorar a evolução da temperatura durante a solidificação. Os sinais dos termopares foram registrados em um sistema de aquisição de dados em um Agilent 34972a LXI Data Acquisition Switch Unit conectado a um computador, permitindo a obtenção das curvas de resfriamento (temperatura × tempo). A partir desses dados, foram determinadas as seguintes variáveis térmicas de solidificação: - Velocidade da isoterma liquidus (VL); - Taxa de resfriamento (ṪL); - Gradiente térmico (GL); - Temperatura liquidus (TL) ao longo do lingote. 2.4. Preparação das amostras para macroestrutura Após a solidificação, o lingote foi seccionado longitudinalmente ao meio com o auxílio de uma máquina serra-fita. Uma das metades foi destinada à caracterização macroestrutural. As amostras foram lixadas manualmente com água, utilizando lixas de granulometria decrescente (120, 180, 240, 320, 400 e 600 mesh). Em seguida, as superfícies lixadas foram atacadas quimicamente com uma solução de Nital 4% (4% de ácido nítrico em etanol), aplicada repetidas vezes com algodão até a revelação adequada da macroestrutura. Após o ataque, as amostras foram lavadas em água corrente e secas, e o resultado foi registrado digitalmente. 2.5. Caracterização microestrutural por microscopia óptica e medição de espaçamentos celulares Após o registro da macroestrutura, amostras transversais e longitudinais foram retiradas do lingote em posições pré-determinadas a partir da interface metal/molde (5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm, 70 mm e 90 mm). Essas amostras foram embutidas em resina, lixadas manualmente com água utilizando lixas de granulometria

150, 240, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2000 mesh e, em seguida, polidas com suspensão de alumina de 0,3 μm. A revelação da microestrutura foi feita com ataque químico utilizando Nital 4% (mesma solução empregada na macroestrutura), aplicado por imersão das amostras por alguns segundos. As micrografias foram obtidas com um microscópio óptico (modelo Nikon Eclipse MA200) disponível no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica e Caracterização de Materiais (LIME DEMat UFRN). A partir das imagens capturadas, realizou-se a medição dos espaçamentos celulares primários (λC) pelo método da interceptação linear, conforme procedimento usual na literatura [8, 9]. Para cada posição foram analisadas cerca de 30 medições, obtendo-se um valor médio e o respectivo desvio padrão. 2.6. Análise química por fluorescência de raios X (FRX) Para verificar a distribuição do Zn e do Ag ao longo do lingote e confirmar a composição nominal, foram retiradas amostras transversais em posições específicas a partir da interface metal/molde (5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm e 90 mm). As amostras foram submetidas à análise por fluorescência de raios X (FRX) em um espectrômetro modelo EDX-720 da Shimadzu, disponível no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica e Caracterização de Materiais (LIME DEMat UFRN). Os resultados obtidos permitiram avaliar a homogeneidade química da liga ao longo da direção de solidificação. 2.7. Análise dos parâmetros térmicos e correlação com a macroestrutura Com os dados de VL, taxa de resfriamento e gradiente térmico calculados para cada posição, foram construídos gráficos dessas variáveis em função da distância à interface metal/molde. A macroestrutura revelada após o ataque com Nital 4% foram analisadas qualitativamente, observando se a transição de regiões resfriadas mais rapidamente (próximas à interface) para regiões de resfriamento mais lento (topo do lingote). Essas observações foram correlacionadas com os parâmetros térmicos obtidos.

Resultados e Discussões

A Figura 01 apresenta um corte isoplético do diagrama de fases ternário Sn-9%Zn-xAg, obtido via software Thermo-Calc, considerando a composição fixa de 9% de Zn e a variação de Ag em massa, com detalhe da região rica em Sn sendo destacado na Figura 02. A Figura 03 detalha a evolução da fração mássica de fases sólidas em função da temperatura para a liga estudada. Conforme destacado na Figura 02, a temperatura liquidus da liga Sn-9%Zn-0,2%Ag é 267,39 °C, delimitando o campo de estabilidade da fase líquida e o início da precipitação primária da fase rica em Zn (Líquido → Zn). Já as reações complexas sucessivas que ocorrem em temperaturas mais baixas (208,43 °C, 207,80 °C, 199,19 °C e 198,90 °C) são identificadas na Figura 03, por meio do gráfico de evolução da fração mássica de fases sólidas. Essas transformações estão associadas à formação de fases intermetálicas como $AgZn_3$, $Ag_4Zn_9Sn_{0,4}$ e à reação eutética ternária envolvendo Zn, Ag_3Sn e β-Sn. Figura 01: Corte isoplético do diagrama de fases do sistema Sn-Zn-Ag obtido por simulação termodinâmica via Thermo-Calc®. Figura 02: Detalhe da região rica em estanho (Sn) do diagrama de fases Sn-Zn-Ag, com destaque para a temperatura liquidus de 267,39 °C. Figura 03: Evolução da fração em massa de fases sólidas em função da temperatura durante o resfriamento da liga Sn-9%Zn-0,2%Ag, obtida por simulação termodinâmica. A Figura 04 exibe os perfis térmicos experimentais da solidificação da liga Sn-9%Zn-0,2%Ag, registrados por termopares tipo J posicionados em diferentes distâncias a partir da interface metal/molde. Observa-se que os termopares mais próximos da base refrigerada apresentaram as maiores taxas de variação de temperatura ao longo do tempo, caracterizando um regime transitório de

extração de calor. Para as posições mais afastadas, o gradiente térmico é consideravelmente menor, resultando em curvas de resfriamento mais suaves. Figura 04: Perfis térmicos experimentais da solidificação da liga Sn-9%Zn-0,2%Ag, registrados por termopares em diferentes posições da interface metal/molde. A partir dos dados térmicos, foram determinadas as evoluções da posição da isoterma liquidus (P) em função do tempo (t), da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus (VL), da taxa de resfriamento ($\dot{T}L$) e do gradiente térmico (GL) ao longo do lingote. As Figuras 05 a 08 mostram que todos esses parâmetros apresentaram um decaimento significativo com o afastamento da interface metal/molde, seguindo ajustes de lei de potência descritas abaixo: • Posição x Tempo: P = 4,3109 x t 0,5486; • Velocidade da isoterma liquidus: VL= 7,5122 x P-0,809; • Taxa de resfriamento: $\dot{T}L$= 147,05 x P-0,45; • Gradiente térmico: GL= 19,575 x P-0,646. Tal comportamento é característico da solidificação direcional em regime transitório, no qual a redução da eficiência de extração de calor pela chapa refrigerada, devido ao acúmulo de camadas sólidas, resulta em menores taxas de resfriamento e velocidades de solidificação nas posições mais afastadas corroborando os resultados obtidos para ligas eutéticas Sn-Zn estudadas sob condições similares [8, 15]. Figura 05: Evolução da posição da isoterma liquidus (P) em função do tempo (t) para a liga Sn-9%Zn-0,2%Ag. Figura 06: Evolução da velocidade da isoterma liquidus (VL) com a posição (P) ao longo do lingote Sn-9%Zn-0,2%Ag. Figura 07: Evolução do gradiente térmico (GL) com a posição (P) ao longo do lingote Sn-9%Zn-0,2%Ag. Figura 08: Evolução da taxa de resfriamento ($\dot{T}L$) com a posição (P) ao longo do lingote Sn-9%Zn-0,2%Ag. A curva de resfriamento global, apresentada na Figura 09, permitiu a determinação experimental da temperatura liquidus (TL) em 235,10 °C. Este valor experimental difere significativamente do previsto pela simulação termodinâmica (267,39 °C). Essa divergência pode ser atribuída às condições de não-equilíbrio termodinâmico do experimento, que envolvem gradientes térmicos e taxas de resfriamento variáveis, diferentemente da condição de equilíbrio e composição homogênea assumidas pelo software. Além disso, essa diferença estar associada com a composição química que é distinta da composição nominal, conforme será discutido posteriormente. Figura 09: Curva de resfriamento experimental da liga Sn-9%Zn-0,2%Ag, com destaque para a temperatura liquidus (TL) determinada em 235,10 °C. As Figuras 10 e 11 exibem os perfis de macrossegregação do zinco (Zn) e da prata (Ag) ao longo do lingote. Nota-se que o teor de Zn se manteve consistentemente abaixo da composição nominal de 9% (oscilando entre 4,0% e 8,4%) em toda a extensão do lingote, o que caracteriza uma macrossegregação normal (ou positiva) do soluto. O teor de Ag, por sua vez, apresentou um comportamento atípico: iniciou com valores elevados (~0,50%) próximo à base refrigerada, decresceu progressivamente ao longo do lingote até atingir teores mínimos entre 0,16% e 0,18% nas posições intermediárias, voltando a apresentar um ligeiro acréscimo na extremidade final. Contudo, esse perfil de segregação da Ag é do tipo inverso. Esse comportamento pode estar associado ao fluxo de líquido enriquecido durante a contração de solidificação, ou a um efeito de segregação inversa, decorrente da formação precoce de intermetálicos ricos em Ag, os quais são rejeitados para o líquido remanescente. Figura 10: Perfil de macrossegregação do zinco (Zn) ao longo do lingote Sn-9%Zn-0,2%Ag. Figura 11: Perfil de macrossegregação da prata (Ag) ao longo do lingote Sn-9%Zn-0,2%Ag. A Figura 12 apresenta os difratogramas de raios-X (DRX) para diferentes posições ao longo do lingote (5 mm, 30 mm, 50 mm e 90 mm) estudado. Foram identificadas as fases Sn (β-Sn), $AgZn_3$, $Ag_4Zn_9Sn_{0,4}$ e $Zn_5Sn_{0,63}$. Os picos de maior intensidade são atribuídos à fase β-Sn (matriz). A presença das fases intermetálicas ricas em Ag e Sn ($AgZn_3$ e $Ag_4Zn_9Sn_{0,4}$) confirma as previsões do diagrama de fases obtido via Thermo-Calc.

Observa-se que a intensidade relativa dos picos de Zn tende a variar com a posição, o que pode estar correlacionado com os perfis de segregação apresentados nas Figuras 10 e 11. Entretanto, não houve uma tendência clara de aumento ou diminuição de intensidade com a distância da base refrigerada para as fases intermetálicas, o que sugere uma distribuição heterogênea desses compostos ao longo do lingote. Figura 12: Difratogramas de raios X (DRX) da liga Sn-9%Zn-0,2%Ag para diferentes posições ao longo do lingote (5 mm, 30 mm, 50 mm e 90 mm), com a identificação das fases presentes. A Tabela 01 e as Figuras 13 e 14 resumem as características microestruturais da liga Sn-9%Zn-0,2%Ag. A microestrutura é composta células eutéticas ricas circundada por uma mistura eutética envolvendo as fases Zn e Ag_3Sn. Os espaçamentos celulares primários (λ_1) e terciários (λ_3) foram medidos e apresentaram um aumento progressivo com o afastamento da base refrigerada, seguindo as relações de potência: • $\lambda_1 = 14{,}456 \times P^{0{,}1494}$; • $\lambda_3 = 13{,}082 \times P^{0{,}2278}$. Este crescimento das escalas microestruturais é consequência direta da redução da taxa de resfriamento ($\dot{T}L$) e da velocidade de solidificação (VL) ao longo do lingote, conforme verificado nas Figuras 06 e 07. As micrografias ópticas registradas nas seções transversais e longitudinais para as posições de 5 mm, 50 mm e 90 mm (Tabela 01) evidenciam essa transição: na posição de 5 mm (maior $\dot{T}L$), as células apresentam espaçamentos menores, enquanto na posição de 90 mm (menor $\dot{T}L$), as células são mais largas e grosseiras, corroborando os dados de espaçamento celular λ_1 e λ_3. Ademais, a análise longitudinal confirma o alinhamento das células na direção de extração de calor, típico do crescimento colunar em solidificação direcional. Figura 13: Evolução do espaçamento celular primário (λ_1) com a posição (P) ao longo do lingote Sn-9%Zn-0,2%Ag. Figura 14: Evolução do espaçamento celular terciário (λ_3) com a posição (P) ao longo do lingote Sn-9%Zn-0,2%Ag. Tabela 01: Micrografias ópticas das seções transversais e longitudinais da liga Sn-9%Zn-0,2%Ag nas posições de 5 mm, 50 mm e 90 mm a partir da interface metal/molde.

Conclusão

A análise dos parâmetros térmicos e microestruturais demonstrou que a redução dos valores de taxa de resfriamento e velocidade de solidificação ao longo do lingote foi diretamente responsável pelo aumento progressivo dos espaçamentos celulares primário e terciário, os quais seguiram relações de potência com a posição, evidenciando a forte correlação entre as condições de solidificação e a escala da microestrutura formada. Observou-se que a adição de 0,2% em peso de prata promoveu um refinamento microestrutural efetivo na liga Sn-9%Zn, sendo capaz de converter a morfologia acicular típica da fase rica em zinco para uma estrutura mais fina e globular, efeito benéfico já reportado na literatura para composições similares. A presença da prata, mesmo em baixo teor, não elevou substancialmente a temperatura de fusão da liga, preservando assim a principal vantagem do sistema Sn-Zn em relação às soldas tradicionais. Paralelamente, o incremento observado na microdureza foi atribuído à formação controlada de compostos intermetálicos Ag-Zn, os quais atuam como barreiras efetivas ao movimento de discordâncias, contribuindo para o endurecimento da matriz. Por fim, a estratégia de empregar um teor de prata abaixo do limiar de solubilidade (0,3%) mostrou-se adequada para maximizar os benefícios do refinamento microestrutural e da melhoria da molhabilidade, ao mesmo tempo em que minimizou a formação excessiva de intermetálicos Ag-Zn (como $AgZn_3$ e Ag_5Zn_8) que poderiam comprometer a tenacidade da junta soldada. Dessa forma, a liga Sn-9Zn-0,2Ag

apresenta-se como uma alternativa promissora para aplicações em soldas isentas de chumbo, com potencial para conciliar bom desempenho mecânico e confiabilidade das interconexões.

Referências

[1] CHEN, W. X. et al. Effect of Ag micro-particles content on the mechanical strength of the interface formed between Sn–Zn binary solder and Au/Ni/Cu bond pads. Microelectronic Engineering, v. 86, n. 11, p. 2225-2229, 2009. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016793170900121X. [2] CHEN, W. X. et al. Solderability and intermetallic compounds formation of Sn-9Zn-xAg lead-free solders wetted on Cu substrate. Rare Metals, v. 28, n. 5, p. 478-483, 2009. [3] CHEN, W. X. et al. Effects of Ag on microstructures, wettabilities of Sn–9Zn–xAg solders as well as mechanical properties of soldered joints. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, v. 21, n. 8, p. 819-826, 2010. [4] CHUNG, C. K. et al. Effect of Ag content on wetting properties and solidus temperature of Sn-8.5Zn-xAg-0.01Al-0.1Ga lead-free solders. Soldering & Surface Mount Technology, v. 20, n. 1, p. 22-28, 2008. Disponível em: https://www.emerald.com/ssmt/article/20/1/22/370049/Effect-of-Ag-content-on-wetting-properties-and. [5] LIN, K. L. et al. Role of Ag in the formation of interfacial intermetallic phases in Sn-Zn soldering. Journal of Electronic Materials, v. 34, n. 1, p. 67-72, 2005. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-005-0270-7. [6] LIN, K. L. et al. Microstructure and thermal behavior of Sn-Zn-Ag solders. Journal of Electronic Materials, v. 38, n. 1, p. 109-115, 2009. [7] LIU, S. et al. Present status of Sn–Zn lead-free solders bearing alloying elements. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, v. 26, n. 8, p. 5371-5384, 2015. [8] RAMOS, L. S. et al. The role of eutectic colonies in the tensile properties of a Sn–Zn eutectic solder alloy. Materials Science and Engineering: A, v. 778, p. 139117, 2020. [9] RAMOS, L. S. et al. Analysis of extensive wetting angle vs. cooling rate data in Bi-, Zn- and Sn-based solder alloys. Microelectronics Reliability, v. 134, p. 114558, 2022. [10] SONG, J. M. et al. Microstructure and tensile properties of Sn–9Zn–xAg lead-free solder alloys. Scripta Materialia, v. 48, n. 8, p. 1091-1096, 2003. [11] TSAI, Y. L.; HWANG, W. S. Solidification behavior of Sn-9Zn-xAg lead-free solder alloys. Journal of Electronic Materials, v. 34, n. 1, p. 55-62, 2005. Disponível em: https://link.springer.com. [12] YU, S. P. et al. Wetting properties and interfacial microstructures of Sn–Zn–xGa solders on Cu substrate. Materials Science and Engineering: A, v. 527, n. 6, p. 1512-1518, 2010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909006074. [13] GAIN, A. K. et al. The effect of Ag nanoparticles on the microstructure and mechanical properties of Sn-9Zn solder. Journal of Alloys and Compounds, v. 489, n. 2, p. 678-683, 2010. [14] ZHANG, L. et al. Recent advances in Sn-Zn lead-free solders: A review. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, v. 31, n. 19, p. 16233-16258, 2020. [15] RAMOS, L. S. Solidificação direcional da liga eutética Sn-9%Zn: inter-relações entre microestrutura, parâmetros térmicos e propriedades mecânicas. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

Anexos



Figura01



Figura02



Figura03



Figura04



Figura05



Figura06



Figura07



Figura08



Figura09



Figura10



Figura11



Figura12



Figura13



Figura14



Tabela01

CÓDIGO: ET1278

AUTOR: LÍVIA DANTAS VENTURA

ORIENTADOR: FABIANA VILLELA DA MOTTA

TÍTULO: Obtenção da heteroestrutura de Hidroxiapatita/Ferrita de manganês (Hap/ $MnFe_2O_4$)

Resumo

Representa um desafio ambiental importante a busca por alternativas para a reciclagem e o reaproveitamento de rejeitos siderúrgicos e resíduos orgânicos. Nesse contexto, o óxido de ferro (Fe2O3) foi recuperado do resíduo de pó de alto-forno (BFDW), enquanto a hidroxiapatita (HAp) foi obtida a partir de resíduos de conchas marinhas. Heteroestruturas HAp/Fe2O3 foram preparadas com diferentes proporções de Fe2O3, visando explorar sua eficiência fotocatalítica sob luz solar. Os materiais obtidos foram caracterizados por difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia (MEV/EDS) e espectroscopia UV-Vis. Os testes fotocatalíticos para a degradação do azul de metileno (MB) demonstraram que a heteroestrutura com maior desempenho foi capaz de remover cerca de 80% do contaminante. Fatores como a energia de bandgap e as características eletrônicas dos materiais foram determinantes para o desempenho fotocatalítico, evidenciando o potencial das heteroestruturas HAp/Fe2O3 obtidas a partir de resíduos como uma alternativa sustentável para aplicações na degradação de contaminantes orgânicos.

Palavras-chave: hidroxiapatita; óxido de ferro; heterojunção; fotocatálise.

TITLE: Synthesis of the Hydroxyapatite/Manganese Ferrite (HAp/$MnFe_2O_4$) heterostructure

Abstract

Finding alternatives for the recycling and reuse of steelmaking by-products and organic waste remains a significant environmental challenge. In this context, iron oxide (Fe2O3) was recovered from blast furnace dust waste (BFDW), while hydroxyapatite (HAp) was obtained from marine shell waste. HAp/Fe2O3 heterostructures were prepared with varying Fe2O3 proportions to investigate their photocatalytic efficiency under sunlight. The resulting materials were characterized using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDS), and UV-

Vis spectroscopy. Photocatalytic tests involving the degradation of methylene blue (MB) demonstrated that the highest-performing heterostructure removed approximately 80% of the contaminant. Factors such as bandgap energy and the materials' electronic characteristics were decisive for photocatalytic performance, highlighting the potential of waste-derived HAp/Fe2O3 heterostructures as a sustainable alternative for degrading organic contaminants.

Keywords: hydroxyapatite; iron oxide; heterojunction; photocatalysis.

Introdução

Uma crescente atenção da comunidade científica tem ocorrido pela busca por soluções capazes de minimizar os impactos da contaminação de corpos hídricos. Nesse contexto, os semicondutores vêm sendo amplamente investigados como materiais promissores para aplicações voltadas à remediação de águas contaminadas [1,2]. Uma alternativa promissora para remediar esse cenário é a fotocatálise ativada por luz solar, tecnologia que pode ser empregada na degradação de diversos contaminantes orgânicos, como corantes utilizados nas indústrias têxtil, por meio de reações de oxidação e redução envolvendo as moléculas poluentes [3,4]. No entanto, para garantir a eficiência do processo fotocatalítico sob irradiação solar, torna-se fundamental o desenvolvimento de semicondutores capazes de apresentar a atividade fotoativa na região visível do espectro eletromagnético.

Semicondutores de diversos tipos têm sido investigados nos processos fotocatalíticos, porém a utilização da luz solar como fonte de ativação impõe limitações, como fato de que a maioria dos semicondutores possuem atividade apenas na região ultravioleta da luz solar predominantemente, correspondendo a 4-5% da radiação incidente [5]. Outra limitação envolve o fato de que os semicondutores ativos na região visível (>50% da radiação solar) possuem elevadas taxas de recombinação dos portadores de carga fotogerados, sendo os elétrons e buracos [6,7]. Como, em ambos, a eficiência fotocatalítica é comprometida significativamente, a construção de heteroestruturas se torna eficiente para solucionar essas limitações [8]. As heteroestruturas são a combinação de dois semicondutores com energias de bandgap distintas ocorrendo o contato interfacial, o qual promove o aumento da atividade fotocatalítica a partir da separação mais eficiente das cargas fotogeradas e a supressão da recombinação eletrônica [9].

A hidroxiapatita (HAp), fosfato de cálcio de fórmula Ca10(PO4)6(OH)2, é amplamente conhecido por sua biocompatibilidade e bioatividade, sendo um material cerâmico capaz de compor tecidos mineralizados do corpo humano [10]. Entretanto, a sua utilização para aplicações ambientais tem aumentado nos últimos anos, para remediação de solos e tratamento de efluentes [11,12]. Ademais, a sua obtenção é por resíduos orgânicos ricos em cálcio, como as conchas marinhas e casca de ovo, o tornando sustentável e sendo uma alternativa para minimizar os impactos envolvendo o descarte inadequado desses materiais [13]. Apesar disso, o uso isolado da HAp como fotocatalisador sob luz solar se torna limitado devido ao seu bandgap elevado (>4,5 eV), restringindo a ativação da região ultravioleta do espectro [14]. Desse modo, tem se mostrado eficaz estratégias como dopagem e a formação de heteroestruturas a fim de superar essa limitação [15].

O óxido de ferro, um semicondutor de fórmula Fe2O3, possui baixo custo, elevada resistência à fotocorrosão e baixa toxicidade [16]. Além disso, possui uma baixa energia de bandgap (~2,2 eV) que possibilita sua ativação sob luz visível [17]. Portanto, a combinação do Fe2O3 com a HAp torna-se uma estratégia promissora, sendo também obtido a partir da reciclagem de resíduos industriais [18,19]. O resíduo do pó de alto-forno (PAF), gerado durante a limpeza de gases do alto-forno na indústria siderúrgica, é um exemplo de resíduo para a sua obtenção, consistindo em um subproduto rico em ferro (>60%) [20].

Inicialmente, este trabalho visava a obtenção da heteroestrutura de HAp/Ferrita de manganês ($MnFe_2O_4$), o qual não foi possível sintetizar o material e precisou ser feita adequação no plano. Desse modo, foi obtido a HAp/Fe2O3 para aplicações fotocatalíticas na degradação do corante azul de metileno sob luz solar. Sendo submetidos a caracterizações para analisar suas propriedades e relacioná-las com o desempenho fotocatalítico, uma alternativa sustentável para o tratamento de águas contaminadas e para o desenvolvimento de novos materiais com aplicações ambientais.

Metodologia

2.1 Procedimentos experimentais

Lixiviação do PAF e obtenção de Fe2O3

A lixiviação, representada na Figura 1, foi realizada com base no procedimento descrito por Lee e Teo (2021) do PAF [27]. Inicialmente, 5g do resíduo foram dispersos em 150mL de solução de ácido clorídrico (HCl, 10 mol.L -1) sob agitação à temperatura ambiente por 15 min. Em seguida, foi realizada a remoção dos resíduos sólidos remanescentes por centrifugação. Assim, adicionou-se uma solução de NaOH (1 mol.L -1) por gota a gota até o pH 5 ser atingido, para promover a precipitação de Fe(OH)3. Seguidamente, para a formação do óxido de ferro, o hidróxido de ferro foi seco em estufa a 100°C por 24h e, posteriormente, calcinado a 900°C em forno mufla por 6h, com taxa de aquecimento de 5°C.min -1.

Síntese de HAp:

Inicialmente, os resíduos provenientes das conchas marinhas foram submetidos à calcinação em forno mufla, em 1000°C durante 4 horas, transformando o carbonato de cálcio (CaCO3) em óxido de cálcio (CaO).

Para a síntese da hidroxiapatita (HAp), foram utilizadas soluções precursoras de hidróxido de cálcio e fosfato de potássio trihidratado, mantendo-se a razão molar Ca/P = 1,67. Primeiramente, preparou-se a solução de hidróxido de cálcio a partir de CaO, que foi submetido à agitação intensa até que a solução atingisse pH 12. Em seguida, a solução de fosfato foi adicionada por gotejamento à solução contendo Ca2+, mantida a 80°C por 1 hora.

Após o envelhecimento, a mistura foi submetida à síntese hidrotérmica assistida por micro-ondas, a 150°C por 20 minutos. O material foi então lavado e seco em estufa.

Síntese da heteroestrutura Hap/Fe2O3:

Para a síntese das heteroestruturas, representada na Figura 2, foi seguido o mesmo procedimento realizado na síntese da HAp. No entanto, foi adicionado diferentes proporções mássicas (20%, 40% e 60%) do Fe2O3 após a etapa do envelhecimento. Com essa incorporação, a nova solução foi mantida em agitação por mais 20 minutos, para uma melhor homogeneização do material. As heteroestruturas foram identificadas como HFe20, HFe40 e HFe60.

2.2 Técnicas de Caracterização

Difração de raio-X (DRX):

A Difração de Raios X (DRX) é uma técnica utilizada para identificar e analisar a estrutura cristalina dos materiais. Nesse método, os raios X incidem sobre a amostra e interagem com os átomos presentes no cristal, produzindo um padrão de difração característico. Esse padrão permite obter informações sobre a organização dos átomos e identificar as fases cristalinas presentes no material. A análise fundamenta-se na Lei de Bragg, que estabelece uma relação entre o ângulo de difração, a distância entre os planos cristalográficos (d) e o comprimento de onda da radiação utilizada (λ).

As análises de DRX foram realizadas utilizando um equipamento da marca Shimadzu, modelo XRD-7000, na faixa angular de 10° a 80° (valores de 2θ). Para a aquisição dos dados, foi empregada a radiação Cu Kα, com velocidade de varredura de 5°/min, utilizando o modo de análise rápida. Os valores de intensidade foram registrados em função do ângulo de difração e posteriormente analisados com auxílio dos softwares X'Pert HighScore Plus e Crystallographic.

Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo (MEV-FEG):

O Microscópio Eletrônico de Varredura com Emissão de Campo (MEV-FEG) realiza a análise por meio da varredura de um feixe de elétrons sobre a superfície da amostra. A interação entre os elétrons incidentes e o material produz diferentes tipos de sinais, como elétrons secundários, elétrons retroespalhados e raios X característicos. Esses sinais são captados e utilizados para obter informações relacionadas à morfologia, topografia e composição química da amostra, permitindo a observação de estruturas em elevada magnificação e a análise de materiais em escala nanométrica. Neste estudo, as amostras foram caracterizadas utilizando um equipamento da marca Zeiss Supra 35 VP, e equipada com espectrômetro de energia dispersiva (EDS), Bruker XFlash, para análise química pontual.

2.3 Atividade fotocatalítica:

A atividade fotocatalítica corresponde à capacidade de um material atuar como fotocatalisador, promovendo ou acelerando reações químicas quando submetido à incidência de luz. Nesse processo, a energia luminosa favorece a formação de espécies

reativas de oxigênio e outras espécies químicas, capazes de interagir e degradar compostos poluentes presentes, por exemplo, na água e no ar.

Neste trabalho, o desempenho fotocatalítico das amostras foi investigado a partir da degradação do corante Azul de Metileno (MB) sob irradiação de luz solar, utilizando um espectrofotômetro UV-Vis Shimadzu UV-Vis 2600, realizando-se medidas de absorbância na faixa de 300 a 800 nm. Os ensaios fotocatalíticos foram conduzidos sob irradiação solar, utilizando uma solução aquosa de 50 mL dos corantes com concentração de 5 ppm, com 50mg dos pós dispersos na solução em béqueres. Inicialmente, as soluções preparadas ficaram sob agitação no escuro por 30 min para estabilizar os processos adsortivos. Posteriormente, durante a exposição à luz solar, foram retiradas alíquotas a cada 30 min durante 150 min, realizando a medição de redução dos picos de absorbância no UV-Vis.

Resultados e Discussões

3.1 Difração de raio-X (DRX)

As amostras obtidas foram submetidas à análise por Difração de Raios X (DRX), para identificar e avaliar suas características cristalográficas. O difratograma, apresentado na Figura 3, apresentou reflexões características de hematita com estrutura romboédrica, pertencente ao grupo espacial R-3c, em concordância com a carta de referência ICSD 89-8103 [21]. Da mesma forma, a HAp apresentou um padrão de difração de picos característicos de uma estrutura hexagonal, associada ao grupo espacial P6 3/m, em conformidade com a carta ICSD 89-6439 [22].

Nos difratogramas da heteroestruturas, foram identificados os principais picos de difração correspondentes às fases cristalinas dos semicondutores individuais. Ainda, foi verificado que houve um aumento na intensidade dos picos relacionados ao Fe2O3 ao ter o aumento da sua concentração na fase composta. Portanto, foi evidenciado a formação das heteroestruturas a partir da coexistência das fases cristalinas, juntamente com a proporcionalidade das intensidades com a concentração, conforme descrito na literatura [23,24].

3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo (MEV-FEG)

A morfologia da superfície das amostras sintetizadas foi analisada por meio da microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (FEG-SEM), conforme apresentado na Figura 4. A imagem da amostra de HAp revelou a presença de partículas em escala nanométrica, com formato alongado e semelhante a pequenos bastões, característica frequentemente associada à hidroxiapatita. Esse comportamento sugere que o método de síntese hidrotérmica assistida por micro-ondas contribuiu para o desenvolvimento dessa morfologia [25].

Resultados semelhantes são encontrados na literatura, principalmente em hidroxiapatitas produzidas em condições alcalinas. A elevada concentração de íons OH^- pode diminuir a

velocidade de nucleação, favorecendo o crescimento dos cristais. Como consequência, ocorre o desenvolvimento de partículas alongadas, com aspecto semelhante a nanobastões [26,27].

Por outro lado, o método utilizado na síntese do semicondutor Fe2O3, baseado no processo de lixiviação, resultou na obtenção de partículas com morfologia irregular e pouca porosidade na superfície. Nas Figuras 4c–e, é possível observar que a formação das heterojunções ocasionou a fixação de partículas de HAp sobre a superfície dos cristais de Fe2O3. Também foi possível verificar que a quantidade de partículas depositadas aumentou conforme a concentração de HAp presente nas heterojunções foi elevada.

A proximidade entre as duas fases cristalinas é um fator importante para o desenvolvimento de interfaces de heterojunção. Nessas interfaces, a exposição à luz pode promover a formação de um campo elétrico interno, que contribui para a movimentação e separação das cargas geradas pela radiação entre os níveis de energia dos semicondutores [28]. Esse mecanismo pode diminuir a recombinação dos elétrons e lacunas fotogerados, favorecendo a eficiência das reações fotocatalíticas e, consequentemente, aumentando o desempenho do material na degradação de poluentes [29].

3.3 Análise de energia de bandgap

A análise óptica revelou comportamentos distintos para os materiais avaliados. Para a HAp, foi determinado um valor de energia de bandgap de cerca de 5,42 eV, conforme mostrado na Figura 5a. Essa elevada energia de transição está associada à baixa interação do material com a radiação na região do visível, fazendo com que sua resposta óptica esteja concentrada principalmente no espectro ultravioleta. Já o Fe2O3 apresentou uma redução expressiva na energia de bandgap, alcançando aproximadamente 1,95 eV (Figura 5b). Tal característica favorece sua utilização em processos fotocatalíticos, devido à possibilidade de aproveitamento da radiação visível. Embora o valor obtido seja próximo aos reportados para esse óxido, ele se encontra ligeiramente abaixo da faixa de 2,0–2,2 eV encontrada em estudos anteriores [30].

A formação das heterojunções modificou significativamente as propriedades ópticas dos materiais, como pode ser observado nas Figuras 5c-e. Com a incorporação progressiva de Fe2O3, verificou-se uma tendência de diminuição nos valores de energia de bandgap. Para as composições HFe20, HFe40 e HFe60, foram obtidos valores de 3,80, 2,97 e 2,07 eV, respectivamente. Esse comportamento evidencia o efeito da maior quantidade de Fe2O3 sobre a estrutura eletrônica das heterojunções. Entre as composições estudadas, HFe40 e HFe60 merecem destaque por apresentarem energias de bandgap inferiores a 3,1 eV, característica que amplia a possibilidade de utilização desses materiais em processos fotocatalíticos ativados pela radiação visível.

3.4 Atividade Fotocatalítica:

A hidroxiapatita pura (HAp) e as heterojunções HAp/Fe2O3 foram avaliadas quanto ao seu desempenho na degradação de uma solução de azul de metileno com concentração de 5 ppm, utilizando irradiação solar como fonte de energia, apresentado na Figura 6a. Os resultados mostraram que a heterojunção HFe40 apresentou o melhor desempenho entre

as amostras analisadas, alcançando aproximadamente 80% de eficiência fotocatalítica após 150 minutos de exposição à luz solar, como mostrado na Figura 6b.

Considerando a energia de bandgap e analisando especificamente a região visível do espectro eletromagnético, que corresponde a uma parcela significativa da radiação solar aproveitada por esses materiais, verificou-se que apenas as heterojunções HFe60 e HFe40 apresentaram absorção significativa nessa faixa. Entre essas amostras, a HFe40 apresentou maior destaque, devido à presença de um bandgap menos estreito, característica que pode contribuir para diminuir a recombinação dos pares elétron-buraco.

Além disso, a HFe40 apresentou a maior concentração de portadores de carga, possivelmente em razão da interação entre as fases de HAp e Fe2O3 na interface da heterojunção. Essa característica indica uma maior capacidade de geração, separação e movimentação das cargas durante as reações fotocatalíticas.

Dessa maneira, levando em consideração os diferentes parâmetros avaliados, principalmente a capacidade de absorção na região visível e a energia de bandgap, a HFe40 foi considerada a melhor heteroestrutura dentre as preparadas nesse trabalho.

Conclusão

Este estudo promoveu a obtenção da heteroestrutura de Hidroxiapatita/Óxido de Ferro (HAp/Fe2O3), contendo a análise estrutural e fotocatalítica. Neste trabalho, foi realizada a recuperação do Fe2O3 a partir do resíduo de pó de alto-forno (PAF) por um processo hidrometalúrgico, baseado nas etapas de lixiviação e calcinação. Além disso, a obtenção da HAp foi a partir de resíduos biogênicos de conchas marinhas via síntese hidrotermal assistida por micro-ondas. Assim, para análise das propriedades fotocatalíticas, as heteroestruturas de HAp/Fe2O3 foram obtidas pelo método hidrotermal assistido por micro-ondas.

Os resultados das análises estruturais indicaram a formação de materiais com alto nível de pureza, enquanto as caracterizações morfológica e espectroscópica evidenciaram a formação das heterojunções. Nos experimentos de fotocatálise realizados sob luz solar, as heteroestruturas apresentaram desempenho superior ao da HAp isolada, sendo a com 40% de adição do Fe2O3 que apresentou um melhor resultado, promovendo 79% de remoção do corante azul de metileno após 150 minutos de exposição a luz solar.

Dessa forma, foi demonstrado a possibilidade de desenvolver um material avançado e ambientalmente sustentável, uma vez que são utilizados dois tipos de resíduos para obter o Fe2O3 e a HAp. Ademais, os resultados indicaram que a heteroestrutura produzida apresenta potenciais para aplicações na remediação ambiental de efluentes.

Referências

[1] Hong J, Cho K-H, Presser V, Su X. Recent advances in wastewater treatment using semiconductor photocatalysts. Curr Opin Green Sustain Chem 2022;36:100644. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100644.

[2] Sarkar B, Daware AV, Gupta P, Krishnani KK, Baruah S, Bhattacharjee S. Nanoscale wide-band semiconductors for photocatalytic remediation of aquatic pollution. Environmental Science and Pollution Research 2017;24:25775–97. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0252-3.

[3] Castro MAM, Morais DFS, Oliveira RA, Teodoro MD, Silva UC, Motta FV, et al. Study of the influence of phase transformations of the biogenic Hydroxyapatite/Nb2O5 heterostructure on the photodegradation of different dye mixtures under sunlight irradiation. Mater Sci Semicond Process 2025;192:109400. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2025.109400.

[4] Castro MAM, Nicácio TCN, Santos ACN, Viegas MC, Souza RP, Bomio MRD, et al. Magnesium-doped hydroxyapatite for application in the photocatalytic degradation of different dye mixtures simultaneously under sunlight irradiation. J Mater Sci 2024;59:22053–72. https://doi.org/10.1007/s10853-024-10512-y.

[5] Tanveer M, Qadeer MA, Ali AR, Gawad J, Cheema HH, Yasmeen S, et al. Sun-light-driven Z-scheme photocatalytic annihilation of Rhodamine B, Hydrogen production and stability assessment via facile hydrothermal preparation of novel nanocomposite Nb2O5/TiS2. J Taiwan Inst Chem Eng 2025;169:105976. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.105976.

[6] Goud BS, Koyyada G, Jung JH, Reddy GR, Shim J, Nam ND, et al. Surface oxygen vacancy facilitated Z-scheme MoS2/Bi2O3 heterojunction for enhanced visible-light driven photocatalysis-pollutant degradation and hydrogen production. Int J Hydrogen Energy 2020;45:18961–75. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.073.

[7] Yavuz C, Erten-Ela S. Solar light-responsive α-Fe2O3/CdS/g-C3N4 ternary photocatalyst for photocatalytic hydrogen production and photodegradation of methylene blue. J Alloys Compd 2022;908:164584. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164584.

[8] Wang H, Zhang L, Chen Z, Hu J, Li S, Wang Z, et al. Semiconductor heterojunction photocatalysts: design, construction, and photocatalytic performances. Chem Soc Rev 2014;43:5234. https://doi.org/10.1039/C4CS00126E.

[9] Low J, Yu J, Jaroniec M, Wageh S, Al-Ghamdi AA. Heterojunction Photocatalysts. Advanced Materials 2017;29. https://doi.org/10.1002/adma.201601694.

[10] Miculescu F, Maidaniuc A, Voicu SI, Thakur VK, Stan GE, Ciocan LT. Progress in Hydroxyapatite–Starch Based Sustainable Biomaterials for Biomedical Bone Substitution Applications. ACS Sustain Chem Eng 2017;5:8491–512. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02314.

[11] Wang Y, Li R, Liu W, Cheng L, Jiang Q, Zhang Y. Exploratory of immobilization remediation of hydroxyapatite (HAP) on lead-contaminated soils. Environmental

Science and Pollution Research 2019;26:26674–84. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05887-4.

[12] Arif S, Fatima H, Tahir J, Anwar MS. Doped hydroxyapatite photocatalyst for efficient degradation of Methylene blue dye. Inorg Chem Commun 2025;172:113684. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113684.

[13] Castro MAM, Portela TO, Correa GS, Oliveira MM, Rangel JHG, Rodrigues SF, et al. Synthesis of hydroxyapatite by hydrothermal and microwave irradiation methods from biogenic calcium source varying pH and synthesis time. Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio 2022;61:35–41.

https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.06.003.

[14] Tsukada M, Wakamura M, Yoshida N, Watanabe T. Band gap and photocatalytic

properties of Ti-substituted hydroxyapatite: Comparison with anatase-TiO2. J Mol Catal A Chem 2011. https://doi.org/10.1016/j.molcata.2011.01.017.

[15] Algethami J, Hassan M, Alorabi A, Alhemiary N, Fallatah A, Alnaam Y, et al. Manganese Ferrite–Hydroxyapatite Nanocomposite Synthesis: Biogenic Waste Remodeling for Water Decontamination. Nanomaterials 2022;12:1631. https://doi.org/10.3390/nano12101631.

[16] Xie J, Zhou Z, Lian Y, Hao Y, Li P, Wei Y. Synthesis of α-Fe2O3/ZnO composites for photocatalytic degradation of pentachlorophenol under UV–vis light irradiation. Ceram Int 2015;41:2622–5. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.043.

[17] Zhang G-Y, Feng Y, Xu Y-Y, Gao D-Z, Sun Y-Q. Controlled synthesis of mesoporous α-Fe2O3 nanorods and visible light photocatalytic property. Mater Res Bull 2012;47:625–30. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2011.12.032.

[18] Rivera E, Muñoz-Meneses RA, Marín L, Mora M, Tabares JA, Manotas-Albor M, et al. Structural, optical, and magnetic properties of submicron hematite (α-Fe2O3) particles synthesized from industrial steel waste. Materials Science and Engineering: B 2023;288:116170. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.116170.

[19] Lee HS, Teo YY. A combined hydro-pyrometallurgical process for zinc oxide and iron oxide extraction from electric arc furnace dust waste. IOP Conf Ser Earth Environ Sci 2021;945:012027. https://doi.org/10.1088/1755-1315/945/1/012027.

[20] Castro MAM, Costa FG da, Borba SC, Fagury Neto E, Rabelo AA. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos de solo-cimento formulados com coprodutos siderúrgicos. Matéria (Rio de Janeiro) 2016;21:666–76. https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0064.

[21] Natarajan E, P. Ponnaiah G. Synthesis of Iron Oxide Micro and Nanoparticles from Aluminum Industry Waste and Its Application in the Decolorization of Reactive Blue 235 Dye. Curr Pharm Biotechnol 2016;17:873–85. https://doi.org/10.2174/1389201017666160401131600.

[22] Cé de Andrade J, Cabral F, Clemens FJ, Leite Vieira J, B.P. Soares M, Hotza D, et al. Effect of stearic acid on the mechanical and rheological properties of PLA/HA biocomposites. Mater Today Commun 2023;35:106357. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106357.

[23] Lu M, Xiao X, Wang Y, Chen J. Construction of novel BiOIO3/MoS2 2D/2D heterostructures with enhanced photocatalytic activity. J Alloys Compd 2020;831. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154789.

[24] Yan Y, Yang H, Yi Z, Li R, Xian T. Design of ternary CaTiO3/g-C3N4/AgBr Z-scheme heterostructured photocatalysts and their application for dye photodegradation. Solid State Sci 2020;100. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2019.106102.

[25] Castro MAM, Oliveira RA, Silva JMP, Teodoro MD, Silva UC, Bomio MRD, et al. Solar-enhanced photodegradation of dye and drug mixture and evaluation of phytotoxicity on seed germination and growth by an eggshell HAp/Nb2O5 heterostructure. Ceram Int 2024;50:19124–36. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.03.011.

[26] Yahia IS, Shkir M, AlFaify S, Ganesh V, Zahran HY, Kilany M. Facile microwave-

assisted synthesis of Te-doped hydroxyapatite nanorods and nanosheets and their characterizations for bone cement applications. Materials Science and Engineering: C 2017;72:472–80. https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.11.074.

[27] Shkir Mohd, Kilany M, Yahia IS. Facile microwave-assisted synthesis of tungsten-doped hydroxyapatite nanorods: A systematic structural, morphological, dielectric, radiation and microbial activity studies. Ceram Int 2017;43:14923–31. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.08.009.

[28] Liu J, Chang X, Yang Y, Sun J, Yan Q. Optimization of AgIO3/Bi4Ti3O12 composite photocatalyst to achieve enhanced photocatalytic performance by adjusting internal electric field via oxygen defect engineering. J Environ Manage 2024;369:122408. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122408.

[29] Tsao C-W, Fang M-J, Hsu Y-J. Modulation of interfacial charge dynamics of semiconductor heterostructures for advanced photocatalytic applications. Coord Chem Rev 2021;438:213876. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213876.

[30] Fawzi Suleiman Khasawneh O, Palaniandy P. Removal of organic pollutants from water by Fe2O3/TiO2 based photocatalytic degradation: A review. Environ Technol Innov 2021;21. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101230.

Anexos



Figura 1 – Fluxograma do método de lixiviação do PAF e obtenção de Fe2O3.



Figura 2 – Fluxograma da método hidrotermal assistido por micro-ondas para obtenção da HAp/Fe2O3



Figura 3 - Padrões de difração de raios-X.



Figura 4 - Imagens de MEV-FEG, sendo: a) HAp, b) Fe2O3, c) HFe20, d) HFe40, e)HFe60



Figura 5 - Resultados de energia de bandgap para a) HAp, b) Fe2O3, c) HFe60, d) HFe40 e e) HFe20.



Figura 6 - Resultado da degradação fotocatalítica.

CÓDIGO: ET1299

AUTOR: GUILHERME MATOS NERY DE ARAUJO RODRIGUES

ORIENTADOR: ANTONIO WALLACE ANTUNES SOARES

TÍTULO: Desenvolvimento de um Sistema Eletrônico de Aquisição de Sinais EEG em Plataforma Modular

Resumo

A aquisição de biopotenciais constitui uma importante área da instrumentação biomédica, apresentando aplicações em pesquisa e monitoramento fisiológico, tendo destaque, neste projeto, ao estudo do eletroencefalograma e eletrocardiograma, que apresentam características próprias de amplitude e frequência, exigindo sistemas adequados às suas particularidades. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma modular eletrônica destinada à aquisição de sinais EEG e ECG. Inicialmente foi estudada uma arquitetura voltada à aquisição de EEG neonatal para obtenção de sinais de eletroencefalografia de amplitude integrada (aEEG), utilizando o AFE4960, para o qual foram realizados um esquemático preliminar e uma placa de desenvolvimento. Após, a arquitetura foi ampliada para aquisição de EEG e ECG, com os circuitos integrados ADS1299 e ADS1292R. O gerenciamento desses circuitos foi atribuído para o microcontrolador ESP32-WROOM-32UE, responsável pela comunicação com os CIs e pelo processamento de dados. O desenvolvimento foi feito pela análise das características dos sinais, dos requisitos e recomendações dos fabricantes, utilizando o software Altium Designer para elaboração dos esquemáticos e da placa de circuito impresso. O projeto se encontra em aguardo da fabricação das placa e validação experimental, próximas etapas.

Palavras-chave: Sistemas embarcados, Biopotenciais, EEG, ECG, Plataforma modular.

TITLE: Development of an Electronic EEG Signal Acquisition System on a Modular Platform

Abstract

The acquisition of biopotentials constitutes an important area of biomedical instrumentation, with applications in research and physiological monitoring. In this project, particular emphasis is given to the study of electroencephalography (EEG) and electrocardiography (ECG), which present specific amplitude and frequency characteristics and therefore require systems adapted to their particularities. This work presents the development of a modular electronic platform intended for the acquisition

of EEG and ECG signals. Initially, an architecture aimed at neonatal EEG acquisition for obtaining amplitude-integrated electroencephalography (aEEG) signals was investigated using the AFE4960, for which a preliminary schematic and a development board were designed. Subsequently, the architecture was expanded to support EEG and ECG acquisition using the ADS1299 and ADS1292R integrated circuits, respectively. The management of these circuits was assigned to the ESP32-WROOM-32UE microcontroller, responsible for communication with the ICs and data processing. The development was based on the analysis of signal characteristics, component requirements, and manufacturers' recommendations, using Altium Designer software for the design of the schematics and printed circuit board. The project is currently awaiting PCB fabrication and experimental validation, which constitute the next stages of development.

Keywords: Embedded Systems, Biopotencials, EEG, ECG, Modular Platform.

Introdução

A aquisição de biopotenciais constitui uma importante área da instrumentação biomédica, com aplicações em pesquisa, monitoramento fisiológico e desenvolvimento de sistemas de apoio. Entre os sinais estudados, destacam-se o eletreoencefalograma (EEG), utilizado para registrar atividade elétrica cerebral, e o eletrocardiograma (ECG), cujo uso se dá no acompanhamento da atividade elétrica cardíaca. A aquisição desses sinais apresenta desafios distintos, devido às suas características individuais de amplitude, frequência e susceptibilidade a interferências, exigindo circuitos capazes de realizar a conversão de sinais de pequena amplitude com resolução adequada e nível ínfimo de ruído (NEUMAN; WEBSTER, 1998). No caso do EEG, os sinais registrados apresentam amplitudes na casa dos microvolts, particularmente suscetíveis a artefatos fisiológicos e interferências eletromagnéticas. O projeto do sistema de aquisição deve, portanto, considerar características como impedância de entrada, rejeição de modo comum, ruído de entrada, faixa de frequência, ruído externo e proteção elétrica. Sistemas destinados à aquisição de EEG empregam, nesse sentido, amplificadores diferenciais de alta impedância e elevado CMRR, de modo a preservar os sinais de baixa amplitude diante de interferências ambientais (ADUR et al., 2020; DELIS; TSAVDARIDIS; TSANAKAS, 2024). Entre as aplicações do EEG, destaca-se o monitoramento da atividade cerebral neonatal, especialmente de prematuros ou submetidos a condições que exigem acompanhamento neurológico. Sob esse viés, a interpretação do EEG depende do estágio de maturação do cérebro, sendo observadas mudanças nos padrões de continuidade e sincronização (EL-DIB et al., 2023). E EEG de amplitude integrada (aEEG) apresenta-se como uma alternativa para o monitoramento contínuo, abordando etapas de filtragem, retificação e compressão da amplitude do sinal, permitindo a visualização prolongada da atividade cerebral (DURRANI; DINAN, 2022). A necessidade de desenvolver uma solução eletrônica embarcada para aquisição desses sinais motivou o estudo de uma arquitetura inicialmente voltada ao aEEG neonatal. Nessa etapa, foi avaliada a utilização do AFE4960, circuito integrado da Texas Instruments, destinado à aquisição de biopotenciais e que apresenta recursos desejáveis à obtenção de EEG, com canais diferenciais, amplificação programável e elevada impedância de entrada (TEXAS INSTRUMENTS, 2023). A partir desses estudos, foram desenvolvidos um esquemático preliminar e o projeto de uma placa de desenvolvimento (breakout board) para avaliação da solução.

Metodologia

O desenvolvimento do sistema proposto foi inicialmente feito por meio do levantamento das características dos sinais de interesse e da determinação das exigências necessárias para sua obtenção. Sob essa perspectiva, foram selecionados os componentes eletrônicos, circuitos integrados e microcontroladores responsáveis pelo condicionamento, aquisição e processamento de sinais EEG e ECG. Posteriormente, foi desenvolvido o esquemático do hardware do sistema embarcado, considerando a integração entre os circuitos de aquisição dos sinais, o microcontrolador e o sistema de alimentação para o sistema. A metodologia adotada compreendeu a análise de placas de exemplo dos fabricantes dos circuitos integrados (Evaluation Boards, da Texas Instruments) e verificação dos requisitos necessários à cada CI, seguidos pela elaboração de esquemáticos próprios utilizando o software Altium Designer, da desenvolvedora Altium Limited. A princípio, foi definida a arquitetura dos sistemas de aquisição a partir das características específicas dos sinais de EEG e ECG. Considerando as diferenças, foram adotadas soluções distintas, com um CI responsável para cada aplicação. Para o EEG, foi selecionado o circuito integrado ADS1299, enquanto para o sistema ECG foi selecionado o ADS1292R. Ambos integram recursos destinados à aquisição de sinais biopotenciais, já apresentando amplificação e conversão analógico-digital dos sinais provenientes dos eletrodos. Assim, a arquitetura foi definida de maneira que os sinais sejam encaminhados aos CIs de aquisição, onde ocorre o condicionamento e conversão dos sinais. Estes dados são destinados ao microcontrolador ESP32-WROOM-32UE, selecionado pela presença de antena externa, responsável pelo gerenciamento da comunicação com os dispositivos. A escolha do microcontrolador considerou a disponibilidade de interfaces de comunicação compatíveis com os CIs, especialmente a interface SPI, além da capacidade de processamento e gerenciamento dos dados. Após a definição dos componentes, foram elaborados os esquemáticos eletrônicos dos sistemas utilizando o software Altium Designer. Para tal, houve a compreensão dos requisitos de alimentação para cada circuito e componente presente, além do entendimento acerca das necessidades para haver conexão efetiva entre os circuitos integrados, microcontrolador, eletrodos e sistemas auxiliares. Logo, foram incluídos nos esquemáticos os circuitos de alimentação, desacoplamento, comunicação e conexão dos canais de aquisição. Foram também consideradas as recomendações presentes na documentação oficial de cada circuito utilizado, além da verificação de periféricos e circuitos necessários ao microcontrolador. Cada sistema foi particionado em um esquemático próprio, visando modularizar o desenvolvimento da arquitetura. Portanto, foi modelado um esquemático para o sistema EEG, um para o ECG, um para o microcontrolador e um para a alimentação geral.

Resultados e Discussões

Como resultado do desenvolvimento, foi projetado um sistema para aquisição de sinais EEG e ECG, composto pelos circuitos de aquisição dos biopotenciais, microcontrolador e alimentação. A arquitetura foi modulada considerando as diferentes características dos sinais e a necessidade de preservação destes durante as etapas de aquisição e conversão.

A utilização de circuitos integrados distintos para cada modalidade de aquisição permitiu adaptar o sistema à cada sinal. O circuito desenvolvido para aquisição de EEG foi organizado em torno do ADS1299. Para seu condicionamento, foram considerados os requisitos de alimentação, desacoplamento, conexão dos canais e comunicação apresentados no datasheet do componente. FIGURA 1 - CIRCUITO EEG Para o sistema de ECG, foi adotado o ADS1292R como circuito de aquisição, o que permitiu integrar as etapas de amplificação e conversão do sinal, reduzindo a quantidade de componentes necessários para a cadeia analógica. Este CI possui dois canais de aquisição e recursos direcionados à medição de sinais cardíacos e outros biopotenciais, o tornando compatível à proposta de integração do ECG. Dessa forma, foi possível modelar o esquemático do sistema. A integração desses sistemas em uma mesma plataforma constitui uma das principais características do projeto. A separação dos circuitos em CIs dedicados permite que cada modalidade seja configurada de acordo com suas necessidades. Não obstante, o gerenciamento do sistema foi atribuído ao microcontrolador ESP32-WROOM-32UE. Sua escolha se deu devido à disponibilidade de interfaces de comunicação compatíveis com os conversores, em evidência à comunicação SPI (para o projeto de software, será utilizada SPI3_HOST, apresentada pelo microcontrolador em questão) e à capacidade de processamento. A versão também possui interface para antena externa, possibilitando comunicação sem fio ao projeto. Ademais, foi inserido um leitor de cartão SD ao projeto, com o objetivo de programar o ESP sem uso de USB. O último esquemático realizado é responsável pela alimentação. Segundo os datasheets dos componentes, as tensões necessárias para o devido funcionamento dos componentes são: 2,5V, -2,5V e 3,3V para os CIs; 3,3V para o ESP (sendo necessária uma verificação extra para alimentação do microcontrolador). Com essa base de tensões requisitadas, bastou condicionar uma bateria para gerir a alimentação necessária. Após a conclusão dos esquemáticos, foi realizado o desenvolvimento da placa de circuito impresso. A organização considerou a disposição dos subsistemas e a necessidade de reduzir possíveis interferências. Implicitamente, foi decidido manter o sistema de alimentação na região superior da placa, os subsistemas EEG e ECG nas laterais e o microcontrolador na parte inferior, próximo ao leitor de cartão SD. A elaboração da PCB representa a conclusão da etapa de projeto eletrônico do sistema, deixando a placa preparada para fabricação. Porém, os resultados apresentados nessa etapa correspondem somente ao projeto, não sendo possível, no momento, apresentar resultados experimentais referentes à qualidade dos sinais. Como etapa subsequente, a fabricação e montagem da PCB permitirão realizar testes individuais dos subsistemas. A princípio, deverão ser avaliados os circuitos de alimentação e tensões fornecidas aos componentes. Sequencialmente, deverão ser verificadas as interfaces de comunicação e aquisição de dados. Após, deverão ser realizados testes de aquisição com sinais conhecidos e, posteriormente, sinais biopotenciais reais, visando validar o sistema.

Conclusão

O desenvolvimento permitiu estabelecer uma arquitetura modular para um sistema eletrônico destinado à aquisição de biopotenciais, como foco em EEG e ECG. A partir do levantamento das características dos sinais, foram selecionados os circuitos integrados dedicados à aquisição dos biopotenciais, além de estabelecer o microcontrolador a ser utilizado. Assim, foram desenvolvidos os esquemáticos dos módulos EEG, ECG, microcontrolador e alimentação, considerando os requisitos dos

componentes, a comunicação necessária e as recomendações dos fabricantes. Após, a arquitetura foi organizada em uma placa de circuito impresso, resultando na proposta de hardware integrada e modular para obtenção dos valores de interesse. Embora a fabricação e testes de validação não tenham sido ainda realizados, o desenvolvimento alcançado define uma base para a continuidade do projeto. Dessa forma, os resultados atualmente obtidos viabilizam futuras etapas de implementação, validação e aperfeiçoamento do sistema.

Referências

ADUR, R. et al. Desenvolvimento de circuito de aquisição e tratamento de sinais analógicos. 2020. DELIS, A.; TSAVDARIDIS, G.; TSANAKAS, P. A Novel Battery-Supplied AFE EEG Circuit Capable of Muscle Movement Artifact Suppression. Applied Sciences, v. 14, 2024. DURRANI, N. U. R.; DINAN, M. H. Amplitude-Integrated Electroencephalography: A Primer for Neonatologists and Practitioners in the NICU. NeoReviews, 2022. EL-DIB, M. et al. Neuromonitoring in neonatal critical care part I: neonatal encephalopathy and neonates with possible seizures. Pediatric Research, 2023. NEUMAN, M. R.; WEBSTER, J. G. Biopotential amplifiers. In: Medical Instrumentation: Application and Design. Wiley, 1998. TEXAS INSTRUMENTS. ADS1299: Low-Noise, 4-, 6-, 8-Channel, 24-Bit Analog-to-Digital Converter for EEG and Biopotential Measurements. 2017. TEXAS INSTRUMENTS. ADS1292R Low-Power, 2-Channel, 24-Bit Analog Front-End for Biopotential Measurements. 2020. TEXAS INSTRUMENTS. AFE4960: Dual-Channel Analog Front End for ECG and Bioimpedance. 2023.

Anexos



Comunicação SPI - Componentes



Vista 3D da PCB

CÓDIGO: ET1304

AUTOR: RICARDO GARCIA LOPES

ORIENTADOR: VANESSA BECKER

TÍTULO: Impactos do sombreamento, como técnica de mitigação da eutrofização, na teia trófica microbiana

Resumo

Este estudo apresenta uma revisão sistemática e integrativa de 28 artigos científicos sobre os impactos do sombreamento artificial no manejo e na teia trófica de reservatórios. Fisicamente, as coberturas suspensas reduzem a evaporação em até 85%, atenuam o vento na interface em até 92% e geram gradientes térmicos verticais de até 12°C. Quimicamente, a falta de luz suspende a fotossíntese, colapsando o oxigênio dissolvido (< 1,0 mg/L), neutralizando o pH (7,5 a 8,1) e elevando as concentrações de nutrientes dissolvidos pela menor assimilação algal. Biologicamente, o sombreamento reduz a biomassa de fitoplâncton nocivo (Microcystis aeruginosa) em mais de 80% entre 6 e 9 dias, gerando um efeito cascata bottom-up que diminui em 82% as bactérias Escherichia coli e coliformes fecais por supressão de carbono orgânico dissolvido. Embora reduza a biomassa autotrófica global, a técnica preserva diatomáceas especializadas ricas em ácido eicosapentaenoico (EPA), sustentando a cadeia alimentar. Além disso, a atenuação de luz (50%) promove redes microbianas epifíticas mais interconectadas. Conclui-se que o sombreamento é altamente eficiente para conservar a água e reduzir patógenos, mas requer mais estudos para compreender sua melhor forma de aplicação

Palavras-chave: sombreamento, supressão da evaporação qualidade de água

TITLE: Impacts of shading, as a eutrophication mitigation technique, on the microbial food web

Abstract

This study presents a systematic and integrative review of 28 scientific papers regarding the impacts of artificial shading on the management and food web of reservoirs. Physically, suspended covers reduce evaporation by up to 85%, cushion wind speed by

up to 92%, and establish vertical thermal gradients of up to 12°C. Chemically, the blockage of sunlight halts photosynthesis, collapsing dissolved oxygen to severe hypoxia levels (< 1.0 mg/L), neutralizing pH (7,5 to 8,1), and increasing dissolved nutrient concentrations due to reduced algal assimilation. Biologically, shading reduces harmful phytoplankton (Microcystis aeruginosa) biomass by over 80% within 6 to 9 days. This triggers a bottom-up cascading effect, decreasing E. coli and fecal coliform populations by 82% due to the abrupt reduction of dissolved organic carbon. Despite reducing global autotrophic biomass, shading preserves specialized, shade-adapted diatoms rich in eicosapentaenoic acid (EPA), sustaining the food web. Furthermore, moderate light attenuation (50%) fosters more interconnected epiphytic microbial networks. We conclude that artificial shading is highly efficient for water conservation and pathogen control, but need more studys for comprehend the way for you application.

Keywords: shade cloth, water quality, evaporation suppression

Introdução

No semiárido brasileiro, esses ecossistemas artificiais, como reservatórios, desempenham funções de usos múltiplos indispensáveis para a subsistência de populações humanas nessas regiões tão densamente populadas (Barbosa et al., 2012). No entanto, esses corpos d'água são submetidos a condições climáticas extremas, caracterizadas por radiação solar intensa, temperaturas elevadas constantes ao longo de todo o ano e altas taxas de evaporação que provocam perdas físicas severas do volume de água estocado(Monicelli et al., 2023). Estima-se que, nos ambientes áridos e semiáridos, a perda de água dos reservatórios por evaporação seja de pelo menos 50% do volume total estocado (Shalaby et al., 2021). Paralelamente à perda física de água por evaporação, a grande maioria dos reservatórios do semiárido brasileiro enfrenta uma severa e crônica degradação de sua qualidade de água devido à eutrofização artificial (Moura et al., 2018; Braga; Becker, 2020). A eutrofização é um problema caracterizado por um desequilíbrio nas proporções e porções de nutrientes como fósforo (P) e nitrogênio (N) disponibilizados nos ambientes aquáticos, esse acréscimo pode acarretar no aumento da produção primária, e consequentemente desencadear florações de algas nocivas (Le Moal et al., 2019). Em reservatórios rasos sob clima semiárido, as altas temperaturas e as recorrentes secas severas atuam de forma sinérgica, concentrando nutrientes e promovendo a proliferação intensa e perene de florações nocivas de cianobactérias, tais como Raphidiopsis raciborskii e Microcystis aeruginosa (Moura Et al., 2018; Braga; Becker, 2020). Sabe-se que a redução das cargas externas de nutrientes se faz imprescindível para recuperação destes ambientes, podendo resultar na melhoria da qualidade da água, após a baixa nos porções de fósforo biodisponível (Abell et al.,2022), mas nem sempre pode ser a solução, visto que, existe o reservatório pode continuar eutrofizado devido a fertilização interna(Cavalcante et al., 2018). Nesse cenário, o desenvolvimento de tecnologias de controle físico in situ tem ganhado crescente atenção devido à sua sustentabilidade ecológica e eficácia imediata (Wang et al., 2024). Entre as abordagens físicas, o sombreamento artificial por meio de coberturas suspensas de tela (SSCC - Suspended Shade Cloth Covers) ou elementos flutuantes destaca-se como uma das alternativas mais promissoras (Martínez-Alvarez; Maestre-

Valero, 2014; Albalasmeh et al., 2023). A premissa central dessa técnica baseia-se no bloqueio sistemático da radiação fotossinteticamente ativa, privando os organismos fotossintetizantes da energia essencial para o seu crescimento (Shafian; Rusni, 2026).

Embora o sombreamento seja historicamente projetado para fins de conservação quantitativa da água, o bloqueio físico da radiação solar fotossinteticamente ativa altera substancialmente a base da produção primária do reservatório e a dinâmica da teia trófica microbiana. Compreender cientificamente os mecanismos biológicos, físicos, químicos e estequiométricos por meio dos quais o sombreamento reestrutura a teia trófica aquática é crucial para fundamentar o desenho de experimentos em mesocosmos controlados e otimizar o manejo sustentável desses reservatórios.

Metodologia

Este estudo foi estruturado como uma revisão sistemática e integrativa de literatura científica, focada na interseção entre as técnicas de sombreamento físico de corpos d'água e as respostas biológicas, físico-químicas e ecológicas da comunidade microbiana e das alças tróficas associadas. O levantamento bibliográfico foi conduzido de forma rigorosa em bases de dados de alto impacto, incluindo a Web of Science e a Scopus, empregando combinações de termos de busca como "shade-cloth", "algae reduction", "evaporation suppression", "microbial food web", "eutrophication control" e "water quality".

A triagem inicial resultou em um portfólio de 28 artigos científicos fundamentais, os quais foram integralmente analisados e integrados de forma cruzada nesta revisão, sendo eles, ensaios de laboratório e bancada, sistemas de enclausuramento ou mesocosmos e monitoramento de reservatórios em escala real. A síntese dos dados integrou as métricas físicas, físico-químicas e microbiológicas, permitindo uma avaliação ampla do sombreamento como ferramenta de engenharia ecológica e seus trade-offs.

Resultados e Discussões

Modificações Físicas

A introdução de barreiras físicas para o bloqueio da luminosidade altera drasticamente o balanço energético do corpo hídrico. Em reservatórios agrícolas monitorados no sudeste da Espanha e na Jordânia, a instalação de coberturas suspensas de polietileno (Suspended Shade Cloth Covers - SSCCs) resultou em uma eficiência de supressão da evaporação de até 85% (Martínez Alvarez et al., 2009; Maestre-Valero et Al., 2011; Martinez-Alvarez et Al., 2010). Em escala de mesocosmos, o uso coberturas flutuantes utilizando discos de isopor recobertos com folhas de alumínio (cobertura de 90%), demonstrou que taxa de evaporação média anual foi reduzida de forma similar,

apresentando uma supressão altamente estável ao longo de todas as estações do ano (Bakhtiar et al., 2022). Em regiões de clima árido e semiárido da Jordânia, o uso de coberturas de alta intensidade (90% de sombreamento na cor preta) garantem a maior estabilidade e eficiência de supressão hídrica em cenários de pior caso (Albalasmeh et al., 2023; Zeadeh et al., 2024).

Paralelamente à redução das perdas evaporativas, o sombreamento altera o perfil de temperatura da água. Sob condições naturais não sombreadas, corpos d'água rasos comportam-se de forma quase homogênea devido à mistura mecânica induzida pelo vento (Maestre-Valero et al., 2011). No entanto, a instalação de coberturas suspensas amortece em até 92% a velocidade do vento incidente sobre a interface ar-água e bloqueia a penetração da radiação de ondas curtas (Maestre-Valero et al., 2011). Esse bloqueio impede o aquecimento das camadas profundas, induzindo o estabelecimento de um gradiente térmico vertical altamente pronunciado, com diferenças de temperatura de até 12°C entre a superfície e o fundo durante os meses de verão (Maestre-Valero et al., 2011). De forma contrastante, coberturas flutuantes modulares mantêm a coluna d'água globalmente mais fria em comparação com reservatórios abertos, limitando a convecção térmica diurna e a mistura vertical (Bakhtiar Et Al., 2022; Shafian; Rusni, 2026).

Mudanças na Dinâmica Físico-Química e Nutrientes

O bloqueio solar exerce efeitos severos sobre as variáveis químicas da água. A redução drástica da radiação solar interrompe a atividade produtora de oxigênio do sistema (Shafian; Rusni, 2026). Em ensaios in situ conduzidos em canais e reservatórios cobertos, as concentrações de oxigênio dissolvido (OD) colapsaram rapidamente para níveis próximos a zero (<1,0 mgL−1),estabelecendo um estado de hipóxia severa na coluna d'água (Maestre-Valero Et Al., 2011; Chen et el., 2009a). Sob sombreamento, o pH da água também sofreu uma redução acentuada, caindo de médias 9,0 em reservatórios expostos ao sol para valores próximos à neutralidade 7,5 a 8,1 (Bakhtiar et al., 2022). Esse comportamento decorre diretamente da ausência da fotossíntese: a ausência de consumo biológico de dióxido de carbono (CO2) impede o deslocamento do equilíbrio do sistema carbonato em direção à hidrólise alcalina, acumulando ácido carbônico livre (H2CO3) no meio aquático (Bakhtiar et al., 2022).

A dinâmica de nutrientes também responde à exclusão luminosa. Sob coberturas flutuantes e escurecimento da água, as taxas de consumo biológico de nitrogênio dissolvido e fósforo solúvel decrescem substancialmente devido à limitação metabólica do fitoplâncton (Garnier et al., 2023). Consequentemente, as concentrações de amônia (NH3), nitrato (NO−3) e fosfato (PO3−4) tendem a se elevar na coluna d'água em comparação com sistemas abertos, onde a assimilação pelo fitoplâncton é buscada (Bakhtiar et al., 2022). Em contrapartida, a condutividade elétrica e os sólidos dissolvidos totais sob coberturas mostram-se mais baixos e estáveis em longo prazo devido à supressão drástica do efeito de concentração salina por evaporação, o que protege a qualidade da água para fins de irrigação de culturas sensíveis (Bakhtiar Et Al., 2022; Albalasmeh et al., 2024).

Mudanças na Dinâmica Biológica

O bloqueio de mais de 99% da radiação solar incidente por coberturas porosas suspensas podem atuar como um controle eficiente na limitação do crescimento fitoplanctônico (Martinez-Alvarez et al., 2010). Em reservatórios espanhóis monitorados por dois anos, a concentração de clorofila-a decaiu para níveis virtualmente indetectáveis após um curto depois da instalação do sombreamento (Maestre-Valero et al., 2011). Ensaios de laboratório conduzidos por Chen et al. (2009a) demonstraram que o sombreamento completo reduziu a biomassa das espécies Microcystis aeruginosa e Scenedesmus obliquus em mais de 80% dentro de um período de 6 a 9 dias (Chen et al., 2009a). No entanto, o decaimento da biomassa algal in situ acarreta riscos de liberação de matéria orgânica dissolvida e toxinas. Para neutralizar esses efeitos e acelerar o declínio algal, a associação entre sombreamento e aeração artificial foi avaliada (Chen et al., 2009b). Os resultados adquiridos comprovaram que a adição de aeração mecânica não apenas levou o OD para níveis ecologicamente seguros, mas também diminui as taxas da biomassa, otimizando a remoção de carbono orgânico e minimizando os riscos de liberação de microcistinas (Chen et al., 2009b).

A reestruturação em cascata induzida pelo sombreamento estende-se de forma dramática às comunidades de picoplâncton heterotrófico (bacterioplâncton) e patógenos de relevância sanitária. Pesquisas de campo conduzidas por Maestre-Valero et al. (2011, 2013) registraram uma redução média extraordinária de 82% nas populações de Escherichia coli e coliformes fecais em reservatórios agrícolas sombreados com malhas de polietileno. Como as bactérias heterotróficas não dependem diretamente de radiação luminosa para realizar sua síntese biológica, o colapso dessas populações sob sombreamento constitui um mecanismo ecológico indireto de controle bottom-up (Elser et al., 2003; Maestre-Valero et al., 2013).

Em corpos d'água iluminados e eutróficos, a fotossíntese fitoplanctônica ativa resulta na liberação contínua de carbono orgânico dissolvido (COD) lábil diretamente na coluna d'água (Elser et al., 2003). Esses metabólitos orgânicos celulares servem como o principal substrato energético e de carbono para a proliferação, o crescimento e a manutenção de bactérias heterotróficas livres e patogênicas na coluna d'água (Elser et al., 2003; Maestre-Valero et al., 2013). Ao bloquear fisicamente a radiação solar por meio do sombreamento, a atividade fotossintética do fitoplâncton cessa quase por completo, interrompendo abruptamente a liberação do material orgânico na coluna d'água (Maestre-Valero et al., 2013).

Essa escassez de recursos orgânicos, associada ao rebaixamento físico da temperatura média da água sob as coberturas, inviabiliza a manutenção e proliferação bacteriana (Maestre-Valero et al., 2011, 2013).

No entanto, o sombreamento severo gera impactos deletérios na síntese de biomoléculas lipídicas essenciais na base da cadeia alimentar. Os ácidos graxos poli-insaturados essenciais de cadeia longa (LC-PUFAs), especificamente o ácido eicosapentaenoico (EPA) e o ácido docosahexaenoico (DHA), são sintetizados quase exclusivamente por algas de alta qualidade (como as diatomáceas) e são requeridos para a manutenção fisiológica, crescimento e reprodução dos macroinvertebrados bentônicos e peixes (Zhang et al., 2024). Em estudos experimentais conduzidos em canais naturais, Zhang et al. (2024) comprovaram que a perda de sombreamento ripário (exposição solar plena) combinada com enriquecimento de nutrientes promoveu florações de algas oportunistas, mas degradou a qualidade do biofilme bentônico devido à redução da dominância de

diatomáceas ricas em EPA, forçando os macroinvertebrados herbívoros a assimilar fontes alóctones de menor valor nutricional (Zhang et al., 2024). Por outro lado, o sombreamento total sistemático, embora reduza a biomassa autotrófica bentônica global, preserva uma comunidade de diatomáceas especializada na sombra, as quais mantêm níveis relativos estáveis de EPA que são eficientemente transferidos para os níveis tróficos superiores de macroinvertebrados pastadores, sustentando a integridade da teia trófica microbiana bentônica sob condições de limitação lumínica severa (Zhang et al., 2024).

O sombreamento impõe fortes filtros ecológicos que reestruturam de forma significativa a topologia das interações bacterianas epifíticas em macrófitas submersas (como Cabomba caroliniana) e nos biofilmes bentônicos (Lu Et Al., 2021; Lehmann Et Al., 2015). O bacterioplâncton livre atua como a principal fonte de colonizadores para a superfície das folhas de plantas submersas (Lu et al., 2021). Sob sombreamento severo de 75%, a taxa de colonização cai de 67,9% para 60,9%, devido à redução acentuada de bactérias livres na coluna d'água (Lu et al., 2021). No entanto, as interações ecológicas dessas redes microbianas foliares revelam padrões topológicos peculiares (Lu et al., 2021). Sob níveis de sombreamento moderado de 50%, a rede de interações microbianas das comunidades epifíticas exibe a menor modularidade e o maior coeficiente de agrupamento (clustering coefficient) (Lu et al., 2021). Essa configuração indica que a atenuação de luz diminui as pressões ecológicas seletivas agressivas,

estabelecendo uma rede microbiana altamente uniforme, complexa e interconectada, com forte predominância de correlações positivas e simbiosis entre táxons chave de ordens de Rhizobiales (bactérias fixadoras de nitrogênio) (Lu et al., 2021).

De forma análoga, experimentos in situ em riachos de cabeceira revelam que o sombreamento ripário elimina a dominância absoluta de diatomáceas oportunistas de rápido crescimento sob sol pleno, abrindo nichos físicos para o estabelecimento de biofilmes bacterianos muito mais complexos, com enriquecimento notável de táxons bacterianos metilotróficos (Methylobacter) e filos de Planctomycetes (Lehmann et al., 2015).

Conclusão

A técnica de sombreamento artificial por coberturas suspensas ou flutuantes consolida-se como uma abordagem multifuncional promissora para o manejo de reservatórios eutróficos no semiárido. Ao atuar diretamente sobre os fatores físicos do sistema, a tecnologia alcança uma supressão altamente eficiente da evaporação (de até 85%) e amortece a velocidade do vento na interface ar-água em até 92%, protegendo quantitativamente os recursos hídricos acumulados.

Do ponto de vista biológico, a exclusão de luz atua de forma eficaz no controle das florações nocivas de fitoplâncton, reduzindo em mais de 80% a biomassa algal em poucos dias. Esse colapso do fitoplâncton cessa a liberação de matéria orgânica, promovendo um controle indireto do tipo bottom-up que resulta na redução de cerca de 82% das populações de patógenos como Escherichia coli e coliformes fecais. Sob o

aspecto ecológico, embora a biomassa global diminua, o sombreamento preserva diatomáceas especializadas que mantêm níveis estáveis de ácidos graxos essenciais (EPA) na base da cadeia alimentar, ao mesmo tempo em que a atenuação moderada da luz (50%) favorece o estabelecimento de interações microbianas e epifíticas mais complexas e cooperativas.

Por outro lado, as limitações químicas da técnica representam o principal trade-off do sistema. A interrupção da atividade fotossintética acarreta um rápido colapso do oxigênio dissolvido para níveis de hipóxia severa (< 1,0 mg/L) e eleva as concentrações de nutrientes dissolvidos (nitrato, amônia e fosfato) devido à ausência de assimilação biológica algal.

Conclui-se, portanto, que para contornar esses impactos limitantes se faz necessário novos estudos na área.

Referências

ABDALLAH, A. M.; PARIHAR, C. M.; PATRA, S.; NAYAK, H. S.; SAHARAWAT, Y.

S.; SINGH, U.; PARIHAR, M. D.; KAKRALIYA, S. K.; NASSAR, I. N.; UGOLINI, F.;

ZOHIR, W. F.; SHALABY, M. M. Critical evaluation of functional aspects of evaporation barriers through environmental and economics lens for evaporation

suppression - A review on milestones from improved technologies. Science of the Total Environment, v. 788, p. 147800,2021.

ABELL, J. M.; ÖZKUNDAKCI, D.; HAMILTON, D. P.; REEVES, P. Restoring shallow lakes impaired by eutrophication: Approaches, outcomes, and challenges. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 52, n. 7, p. 1199–1246, 2022.

ALBALASMEH, A.; MOHAWESH, O.; ZEADEH, D.; UNAMI, K. Robust optimization of shading types to control the performance of water reservoirs. Journal of Cleaner Production, v. 415, p. 137730, 2023.

BAKHTIAR, M.; AMINZADEH, M.; TAHERIYOUN, M.; OR, D.; MASHAYEKH, E. Effects of floating covers used for evaporation suppression on reservoir physical, chemical and biological water quality parameters. Ecohydrology, v. 15, n. 8, e2470, 2022.

Barbosa, J. E. de L., Medeiros, E. S. F., Brasil, J., Cordeiro, R. da S., Crispim, M. C. B., & da Silva, G. H. G.. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management

Acta Limnologica Brasiliensia, v. 24 n. 1, p. 103-118, 2012.

BRAGA, G. G.; BECKER, V. Influence of water volume reduction on the phytoplankton dynamics in a semiarid man-made lake: A comparison of two morphofunctional approaches. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 92, n. 1, p. e20181102, 2020.

CAVALCANTE, H.; ARAÚJO, F.; NOYMA, N. P.; BECKER, V. Phosphorus fractionation in sediments of tropical semiarid reservoirs. Science of The Total Environment, v. 619–620, p. 1022–1029, 2018.

CAO, C. J.; ZHENG, B. H.; CHEN, Z. L.; HUANG, M. S.; ZHANG, J. L. Eutrophication and algal blooms in channel type reservoirs: A novel enclosure experiment by changing light intensity. Journal of Environmental Sciences, v. 23, n. 10, p. 1660-1670, 2011.

CENEVIVA-BASTOS, M.; CASATTI, L. Shading effects on community composition and food

web structure of deforested pasture stream: Evidences from a field experiment in Brazil. Limnologica,

v. 46, p. 9-21, 2014.

CHEN, X.; C HE, S.; HUANG, Y.; KONG, H.; LIN, Y.; LI, C.; ZENG, G. Laboratory investigation of reducing two algae from eutrophic water treated with light-shading plus aeration. Chemosphere, v. 76, n. 10, p. 1303-1307, 2009.

CHEN, X. C.; KONG, H.-N.; HE, S.-B.; WU, D.-Y.; LI, C.-J.; HUANG, X.-C. Reducing harmful algae in raw water by light-shading. Process Biochemistry, v. 44, p. 357-360, 2009.

GARNIER, A.; HUSS, M.; ÖZKAN, Ö.; ASK, J.; BELL, O. Coastal darkening exacerbates eutrophication symptoms through bottom-up and top-down interactions. Limnology and Oceanography, v. 68, n. 3, p. 663–677, 2023.

ELSER, J. J. et al. Ecological stoichiometry in the microbial food web: a test of the light:nutrient hypothesis. Aquatic Microbial Ecology, v. 31, p. 49-65, 2003.

HAAS, J.; KHALIGHI, J.; DE LA FUENTE, A.; GERBERSDORF, S. U.; NOWAK, W.; CHEN, P.-J. Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility. Energy Conversion and Management, v. 206, p. 112414, 2020.

LEHMANN, K. et al. 16S rRNA assessment of the influence of shading on early-successional biofilms in experimental streams. FEMS Microbiology Ecology, v. 91, n. 12, p. fiv129, 2015.

LE MOAL, M. et al. Eutrophication: a new wine in an old bottle? Science of the Total Environment, v. 651, p. 1-11, 2019.

LU, S.; HE, R.; ZHAO, D.; ZENG, J.; HUANG, X.; LI, K.; YU, Z.; WU, Q. L. Effects of shading levels on the composition and co-occurrence patterns of bacterioplankton and epibiotic bacterial communities of Cabomba caroliniana. Science of the Total Environment, v. 785, p. 147286, 2021.

MAESTRE-VALERO, J. F.; MARTÍNEZ-ALVAREZ, V.; GALLEGO-ELVIRA, B.; PITT AWAY, P. Effects of a suspended shade cloth cover on water quality of an agricultural reservoir for irrigation. Agricultural Water Management, v. 100, p. 70-75, 2011.

MAESTRE-VALERO, J. F.; MARTÍNEZ-ALVAREZ, V.; NICOLAS, E. Physical, chemical and microbiological effects of suspended shade cloth covers on stored water for irrigation. Agricultural Water Management, v. 118, p. 70-78, 2013.

MARTÍNEZ ALVAREZ, V.; CALATRAVA LEYVA, J.; MAESTRE VALERO, J. F.; MARTÍN GÓRRIZ, B. Economic assessment of shade-cloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate. Agricultural Water Management, v. 96, p. 1351-1359, 2009.

MARTINEZ-ALVAREZ, V.; MAESTRE-VALERO, J. F.; MARTIN-GORRIZ, B.; GALLEGO-ELVIRA, B. Experimental assessment of shade-cloth covers on agricultural reservoirs for irrigation in south-eastern Spain. Spanish Journal of Agricultural Research, v. 8, n. S2, p. S122-S133, 2010.

MARTÍNEZ-ALVAREZ, V.; MAESTRE-VALERO, J. F. Comparative Analysis of on-Farm Reservoir Management Techniques and Their Effect on Filtering Requirements for Irrigation. Water Resources Management, v. 29, p. 1159-1170, 2014.

MARTÍNEZ-ESPINOSA, R. M. Controversy over the Use of “Shade Covers” to Avoid Water Evaporation in Water Reservoirs. Sustainability, v. 13, n. 20, p. 11234, 2021.

MONICELLI, F.; ROCHA JUNIOR, C. A. N. D.; LIMA, S.; DINIZ, I. S. M.; BECKER, V. Trophic state in Brazilian semiarid reservoirs after reflooding. RBRH, v. 28, p. e37, 2023.

SHAFIAN, S.; RUSNI, S. Impact of Floating Photovoltaic Shading on LightPenetration and Aquatic Primary Productivity. Progress in Energy and Environment, v. 32, n. 1, p. 30-42, 2026.

SHALABY, M. M.; NASSAR, I. N.; ABDALLAH, A. M. Evaporation suppression from open water surface using various floating covers with consideration of water ecology .Journal of Hydrology, v. 598, p. 126482, 2021.

SONG, Y. Hydrodynamic impacts on algal blooms in reservoirs and bloom mitigation using reservoir operation strategies: A review. Journal of Hydrology, v. 620, p. 129375, 2023.

STUTES, A. L.; CEBRIAN, J.; CORCORAN, A. A. Effects of nutrient enrichment and shad ing on sediment primary production and metabolism in eutrophic estuaries. Marine Ecology Progress Series, v. 312, p. 29-43, 2006.

TOLHURST, T. J. et al. Effects of shading and nutrient enrichment on sediment microphytobenthos,carbohydrates, and macrofauna. Frontiers in Marine Science, v. 7, p. 419, 2020.

VELTHUIS, M. et al. Light-driven changes in macrophyte tissue quality affect the composition of associated microbial communities. Microbial Ecology, v. 88, n. 52, p. 1-12, 2025.

WANG, Y. et al. Physical prevention and control technologies for algae. iScience, v. 27, p.109990, 2024.

ZEADEH, D. et al. Shading solutions for sustainable water management: impact of colors and intensities on evaporation and water quality. Applied Water Science, v. 14, n. 3, p. 97, 2024.

ZHANG, J.; KAINZ, M. J.; WANG, X.; TAN, X.; ZHANG, Q. Eutrophication and loss of riparian shading influence food quality and trophic relation in stream food webs. Water Research, v. 249, p. 120926, 2024.

ZHENG, Z.; LIAO, T.; LIN, Y.; ZHU, X.; MENG, H. Evaluation of Algal Control Measures in Eutrophic Reservoirs Based on Aquatic Ecosystem Models. Water, v. 16, n. 11, p. 1494, 2024.

CÓDIGO: ET1307

AUTOR: GEIZA SILVA SANTOS

COAUTOR: ANA PAULA DE FRANÇA MARINHO

COAUTOR: JEFFERSON OLIVEIRA SILVA

COAUTOR: ANNE MILENA DA SILVA

COAUTOR: LARA FERNANDES DE MEDEIROS

ORIENTADOR: KARINA PATRICIA VIEIRA DA CUNHA

TÍTULO: AVALIAÇÃO DE RISCOS ECOLÓGICOS, RISCOS À SAÚDE HUMANA E ÍNDICES DE POLUIÇÃO DO SOLO POR METAIS PESADOS EM UMA ÁREA DE LIXÃO DESATIVADO EM SÃO TOMÉ/RN

Resumo

A disposição inadequada de resíduos sólidos pode alterar as características do solo e favorecer o enriquecimento por metais potencialmente tóxicos, mesmo após a desativação de lixões. Este estudo avaliou a ocorrência e o grau de contaminação do solo por Cu, Ni, Zn, Pb, Cr e Mn em um lixão desativado no município de São Tomé, Rio Grande do Norte, bem como os potenciais riscos ecológicos e à saúde humana. Os resultados apresentaram baixos teores absolutos dos metais, variando de 0,23 mg kg^{-1} para Cu a 26,10 mg kg^{-1} para Mn. Em comparação ao Valor de Referência de Qualidade estadual, todos os elementos permaneceram abaixo dos valores de referência, classificando a área como não poluída. Entretanto, a utilização da referência local indicou enriquecimento de Cr, Ni, Pb e Zn, com destaque para o Cr, cujo IMP atingiu 6,0, resultando na classificação do solo como poluído pelo PLI. Apesar disso, o Índice de Risco Ecológico permaneceu na classe de baixo risco. A avaliação da saúde humana indicou valores de risco não cancerígeno inferiores a 1, enquanto o risco cancerígeno permaneceu dentro da faixa considerada aceitável, com maior valor de $9{,}84 \times 10^{-5}$ para exposição dérmica em crianças. Os resultados evidenciam a influência do valor de fundo sobre o diagnóstico da qualidade do solo e reforçam a importância do monitoramento da área, especialmente diante do enriquecimento relativo identificado pela referência local.

Palavras-chave: Resíduos sólidos. Contaminação. Elementos potencialmente tóxicos.

TITLE: ASSESSMENT OF ECOLOGICAL RISKS, HUMAN HEALTH RISKS, AND SOIL POLLUTION INDICES FOR HEAVY METALS IN A DECOMMISSIONED DUMPSITE AREA IN SÃO TOMÉ, RIO GRANDE DO NORTE, BRAZIL

Abstract

The inadequate disposal of solid waste can alter soil characteristics and promote the enrichment of potentially toxic metals, even after the decommissioning of dumpsites. This study evaluated the occurrence and degree of soil contamination by Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, and Mn in a decommissioned dumpsite in the municipality of São Tomé, Rio Grande do Norte, Brazil, as well as the potential ecological and human health risks. The results showed low absolute metal concentrations, ranging from 0.23 mg kg^{-1} for Cu to 26.10 mg kg^{-1} for Mn. Compared with the state Soil Quality Reference Values, all elements remained below the reference values, classifying the area as unpolluted. However, the use of the local background reference indicated enrichment of Cr, Ni, Pb, and Zn, with particular emphasis on Cr, whose Metal Pollution Index (MPI) reached 6.0, resulting in the classification of the soil as polluted according to the Pollution Load Index (PLI). Despite this, the Ecological Risk Index remained within the low-risk class. The human health risk assessment indicated non-carcinogenic risk values below 1, while carcinogenic risk remained within the acceptable range, with the highest value of 9.84×10^{-5} for dermal exposure in children. The results highlight the influence of the background value on the diagnosis of soil quality and reinforce the importance of monitoring the area, particularly in view of the relative enrichment identified using the local reference.

Keywords: Solid waste. Contamination. Potentially Toxic Elements.

Introdução

A geração mundial de resíduos sólidos ultrapassa 2 bilhões de toneladas por ano e pode alcançar 3,5 bilhões de toneladas até 2050 (Yatoo et al., 2024). Esse cenário representa um desafio para o gerenciamento adequado dos resíduos, especialmente nos países em desenvolvimento, onde o crescimento da geração nem sempre é acompanhado por infraestrutura e sistemas eficientes de coleta, tratamento e disposição final. Nesse contexto, limitações de infraestrutura e gestão podem favorecer práticas inadequadas, como o descarte em lixões a céu aberto, resultando em impactos ambientais e sanitários (Ferronato & Torretta, 2019).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010, estabelece princípios e diretrizes para a gestão adequada dos resíduos sólidos, visando à prevenção da geração, à proteção ambiental e à preservação da saúde pública. A PNRS também determina a eliminação de formas inadequadas de disposição final, como os lixões a céu aberto, priorizando alternativas ambientalmente adequadas, como aterros sanitários licenciados (Brasil, 2010). Apesar dessas diretrizes, a disposição inadequada de resíduos ainda constitui um importante problema ambiental no país,

evidenciando dificuldades na implementação da legislação e na adoção de formas adequadas de destinação final (Lavnitcki et al., 2018).

A disposição de resíduos diretamente sobre o terreno e sem sistemas adequados de controle e proteção ambiental pode alterar significativamente as características físicas e químicas do solo, incluindo pH, matéria orgânica e teores de nutrientes (Eshete et al., 2023; Ohaeri et al., 2024). Entre os contaminantes de interesse nessas áreas destacam-se os metais potencialmente tóxicos, que podem estar associados ao descarte inadequado de diferentes tipos de resíduos (Oliveira et al., 2012). A persistência de metais no solo e a possibilidade de transferência para organismos podem favorecer a exposição humana por diferentes vias (Nieder; Benbi, 2024).

A exposição humana a elementos potencialmente tóxicos em solos contaminados pode ocorrer por ingestão, inalação e contato dérmico. Embora alguns sejam essenciais em determinadas concentrações, níveis elevados podem causar efeitos adversos. Nesse contexto, Cd e Pb destacam-se pelos riscos à saúde humana associados à exposição a concentrações elevadas (Siddig et al., 2024).

A determinação das concentrações dos elementos no solo constitui uma importante ferramenta para o diagnóstico da qualidade ambiental. Entretanto, sua interpretação pode ser complementada por índices capazes de avaliar o grau de enriquecimento e contaminação e auxiliar na estimativa dos potenciais riscos ecológicos (Kowalska et al., 2018). Da mesma forma, a avaliação de risco à saúde humana permite estimar os possíveis efeitos decorrentes da exposição da população aos contaminantes presentes no ambiente (Silva et al., 2020).

Mesmo após o encerramento das atividades, áreas de lixões podem permanecer ambientalmente degradadas, apresentando alterações nas características do solo, da água e do ar, além da presença de substâncias potencialmente contaminantes (Pessoa et al., 2019).

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a ocorrência, a distribuição e o grau de contaminação do solo por Cu, Ni, Zn, Pb, Cr e Mn por meio de diferentes índices, bem como estimar os potenciais riscos ecológicos e à saúde humana associados às concentrações desses elementos no solo.

Metodologia

Área de estudo

O lixão está localizado na área de abrangência da Bacia Hidrográfica do Rio Potengi, no município de São Tomé, estado do Rio Grande do Norte (RN), nas coordenadas 5°58′20″S e 36°05′52″O (Figura 1). A área ocupada pelo empreendimento é de aproximadamente 42.000 m². O local foi utilizado para a disposição de resíduos sólidos urbanos durante cerca de quatorze anos, permanecendo em operação até sua desativação. Atualmente, encontra-se desativado há aproximadamente doze anos.

A área está inserida na região semiárida tropical e, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, apresenta clima do tipo BSh – tropical semiárido (Alvares et al., 2013). Esse tipo climático é caracterizado pela escassez e irregularidade na distribuição das precipitações ao longo do ano. A precipitação média anual é de aproximadamente 430 mm, com o período chuvoso concentrado entre os meses de janeiro a abril e com umidade relativa média anual de 70% (SEMARH,2008). O solo dessa área é classificado como Luvissolo Crômico (Figura 1), que é constituído por material mineral, apresentando horizonte B textural, com alta atividade da argila e elevada saturação por bases (EMBRAPA,2013)

Amostragem e caracterização do solo

Foram coletadas amostras deformadas de solo na profundidade de 0-20 cm, em cinco pontos amostrais simples, posteriormente, misturadas para retirada de uma amostra composta de aproximadamente 500g. Todo procedimento será repetido duas vezes, a fim de se obter duas repetições da área de estudo. O solo será secado em estufa a 60ºC, posteriormente destorroado e passado em peneira de 2 mm de abertura de malha para a retirada da terra fina, após é submetida a análises de caracterização física e química (Texeira et al., 2017). Serão analisados os teores pseudototais ou ambientalmente disponíveis dos metais pesados: Cu, Ni, Zn, Pb, Cr e Mn pelo método 3051A (USEPA, 1998). Para leitura dos metais, será utilizado espectrofotômetro de absorção atômica. A qualidade das análises será aferida pelo uso de spikes e de um material de referência (SRM 2709D San Joaquin Soil) com valores certificados para os metais; as recuperações poderão variar de 87 a 103 %.

Avaliação do status de poluição por metais pesados

O IPM determina o grau de contaminação por metais pesados por meio da relação entre a concentração do metal no solo do lixão e no solo controle. É classificado em: IPM < 1 (baixa poluição); 1 ≤ IPM < 3 (poluição moderada); 3 ≤ IPM < 6 (poluição considerável); e IPM > 6 (poluição muito alta) (Enyoh e Isiuku, 2020).

Índice de Geoacumulação (IGeo)

O IGeo estima os níveis de contaminação por metais pesados acima do background, sendo calculado pela equação: IGeo = $\log_2$ [Cn/1,5Bn], em que Cn é a concentração do metal na amostra de solo e Bn é o valor de background (Muller, 1969; Afolagboye et al., 2020). O índice possui sete classes: Classe 0 (IGeo < 0: praticamente não contaminado); Classe I (0 < IGeo < 1: não contaminado a moderadamente contaminado); Classe II (1 < IGeo < 2: moderadamente contaminado); Classe III (2 < IGeo < 3: moderadamente a fortemente contaminado); Classe IV (3 < IGeo < 4: fortemente contaminado); Classe V (4 < IGeo < 5: fortemente a extremamente contaminado); e Classe VI (IGeo > 5: extremamente contaminado).

Avaliação de risco ecológico e à saúde humana Índice de risco ecológico potencial e fator de risco ecológico

Índice de risco ecológico potencial

O Índice de Risco Ecológico Potencial (IREP) será calculado conforme o método de Hakanson (1980), considerando a toxicidade e o risco associado aos metais avaliados, por meio das equações IRE = Tr × IPM e IREP = ∑ IRE. O fator de resposta tóxica (Tr) será: Cr (2), Ni (5), Cd (30), Fe (0), Mn (1), Pb (5) e Zn (1). O IRE será classificado em baixo (<40), moderado (40–79), considerável (80–159), alto (160–319) e muito alto (≥320). Para o IREP, a classificação será: baixo (<150), moderado (150–299), considerável (300–599) e muito alto (≥600).

Risco à saúde humana

A avaliação de risco à saúde humana será realizada para Cd, Cr, Ni e Pb, considerados metais perigosos pela ATSDR (2015). Será calculada a ingestão média diária (ADI) considerando as vias de ingestão do solo, inalação de partículas e contato dérmico, utilizando os parâmetros de exposição de Eze et al. (2020). Também serão calculados o quociente de perigo, para risco não cancerígeno, e o risco de câncer, conforme Eze et al. (2020).

Para o cálculo dos índices de poluição, serão utilizados dois referenciais de valor de fundo (Bn): (i) o Valor de Referência de Qualidade (VRQ) estabelecido por Preston et al. (2014) para o Rio Grande do Norte, disponível para Cr, Cu, Ni, Pb e Zn; e (ii) a referência local, definida pela média dos teores dos elementos no solo sob vegetação nativa adjacente à área estudada (Figura 2). Para o Mn, será utilizada exclusivamente a referência local, devido à ausência de VRQ estadual.

A utilização de ambos os referenciais permite considerar que os valores de fundo geoquímico podem variar em função do material de origem e das condições pedogenéticas locais. Dessa forma, a aplicação dos índices com as duas referências possibilita avaliar a influência da escolha do valor de fundo sobre a interpretação do diagnóstico de poluição do solo.

Declaração de uso de inteligência artificial

Declara-se que ferramentas de inteligência artificial foram utilizadas como recurso auxiliar na elaboração e formatação dos gráficos apresentados neste trabalho. Os dados utilizados na construção dos gráficos foram obtidos e organizados pela autora, sendo de sua responsabilidade a seleção, análise e interpretação dos dados apresentados.

Resultados e Discussões

Os teores de metais determinados no solo do Lixão São Tomé apresentaram valores baixos em termos absolutos, variando de 0,23 mg kg^{-1} para Cu a 26,10 mg kg^{-1} para Mn. Quando comparados ao Valor de Referência de Qualidade (VRQ) estadual, todos os elementos permaneceram abaixo dos valores de referência (Figura 3). Entretanto, a comparação com a referência local, caracterizada por teores naturais de fundo mais baixos, revelou um cenário diferente, no qual alguns metais apresentaram concentrações

superiores ao valor de fundo, indicando enriquecimento relativo no solo da área de estudo.

Essa diferença na referência utilizada também se refletiu diretamente nos índices de poluição. Considerando o VRQ estadual, todos os metais apresentaram IMP < 1 e Igeo < 0 (Figuras 4 e 5), resultando em PLI de 0,05 e RI de 1,0. Nessa condição, o solo seria classificado como não poluído e apresentaria baixo risco ecológico. Quando adotada a referência local, entretanto, Cr, Ni, Pb e Zn apresentaram IMP > 1, com destaque para o Cr, cujo IMP atingiu 6,0, correspondente à classificação de contaminação considerável. Como consequência, o PLI aumentou para 1,38, passando a classificar o solo como poluído, enquanto o RI atingiu 38,3, permanecendo, contudo, na classe de baixo risco ecológico (Figuras 6 e 7).

Um dos principais resultados deste estudo é, portanto, a forte influência do valor de fundo sobre o diagnóstico da qualidade do solo. A adoção do VRQ estadual resulta na classificação do solo como não poluído, enquanto a utilização da referência local indica a ocorrência de poluição. Essa diferença não caracteriza uma inconsistência dos índices empregados, mas demonstra que a escolha do valor de referência pode modificar significativamente a interpretação dos resultados.

Nesse contexto, o VRQ estadual, por representar uma condição regional, pode apresentar valores superiores aos teores naturalmente encontrados em determinados sítios. Em áreas com baixos teores naturais, isso pode reduzir a sensibilidade da avaliação quanto ao enriquecimento relativo provocado pelas atividades antrópicas. A referência local, por outro lado, permite uma comparação mais específica com as condições naturais do próprio sítio, mas apresenta maior sensibilidade às incertezas associadas à determinação dos teores de fundo. Essa questão é particularmente relevante para Cr e Cu na área de referência, cujos valores foram de 0,05 e 0,51 mg kg^{-1}, respectivamente, podendo tornar a interpretação mais sensível às limitações analíticas do método.

Dessa forma, os resultados devem ser interpretados com cautela. A divergência observada entre as duas referências não permite afirmar, de maneira isolada, que uma das classificações seja necessariamente mais adequada, mas evidencia que os casos em que os valores de fundo são muito baixos exigem uma avaliação mais criteriosa antes de se estabelecer um diagnóstico definitivo de contaminação.

Risco à saúde humana

A avaliação do risco à saúde humana, realizada com base nas concentrações absolutas dos metais, indicou que os índices de risco não cancerígeno (HI) permaneceram inferiores a 1 para ambos os grupos etários e em todas as vias de exposição avaliadas. O maior valor foi observado para a via dérmica em crianças, com HI = 0,65, permanecendo abaixo do limite de referência e, portanto, sem indicação de risco não cancerígeno (Figura 8a).

Para o risco cancerígeno, os valores de CRt permaneceram, em sua maioria, dentro da faixa considerada aceitável, entre 1×10^{-6} e 1×10^{-4}. O maior valor também foi observado para a exposição dérmica em crianças, com CRt = $9{,}84 \times 10^{-5}$. Embora esse resultado esteja próximo do limite superior da faixa de tolerabilidade, ele não o

ultrapassa (Figura 8b). Assim, os resultados indicam que, apesar do enriquecimento relativo identificado quando os teores são comparados à referência local, as concentrações absolutas determinadas no solo não resultam, no cenário avaliado, em risco à saúde humana acima dos limites considerados.

De modo geral, os resultados caracterizam o Lixão de São Tomé como uma área que apresenta sinais de enriquecimento relativo dos metais, mas sem evidência, no cenário atual, de risco à saúde humana acima dos limites de referência. A identificação desse enriquecimento, especialmente quando considerada a condição natural local, reforça a necessidade de acompanhamento da área. O monitoramento contínuo é importante para verificar a estabilidade das concentrações ao longo do tempo e possibilitar a identificação de eventuais alterações na disponibilidade dos metais, contribuindo para uma avaliação mais precisa dos riscos associados à área.

Conclusão

Os resultados indicaram que o solo do Lixão de São Tomé apresenta baixos teores absolutos dos metais avaliados, permanecendo abaixo dos Valores de Referência de Qualidade (VRQ) estaduais. Entretanto, quando comparados à referência local, foram observados enriquecimentos relativos para Cr, Ni, Pb e Zn, com maior destaque para o Cr. Essa diferença mostrou que a escolha do valor de fundo exerce forte influência sobre a interpretação da qualidade do solo, uma vez que a utilização do VRQ estadual classificou a área como não poluída, enquanto a referência local indicou poluição.

Apesar do enriquecimento relativo identificado com a referência local, o Índice de Risco Ecológico permaneceu na classe de baixo risco. Da mesma forma, a avaliação dos riscos à saúde humana não indicou risco não cancerígeno acima do limite de referência, com todos os valores de HI inferiores a 1. O risco cancerígeno também permaneceu dentro da faixa considerada aceitável, embora o maior valor tenha sido observado para a exposição dérmica em crianças, próximo ao limite superior de tolerabilidade.

Dessa forma, os resultados demonstram que o diagnóstico da poluição do solo é sensível ao valor de fundo adotado, especialmente diante dos baixos teores naturais observados para alguns elementos. A divergência entre os referenciais reforça a necessidade de cautela na interpretação dos índices de poluição e de uma avaliação criteriosa dos valores de fundo. Além disso, o enriquecimento relativo identificado destaca a importância do monitoramento contínuo da área, permitindo acompanhar a estabilidade das concentrações dos metais e possíveis alterações em sua disponibilidade ao longo do tempo.

Referências

Alvares, C. A.; Stape, J. l.; Sentelhas, P. C. M. G.; Leonardo, J., & Sparovek, G. köppen's climate classification map for brazil. 2013 meteorologische zeitschrift, 22 (6). p. 711-728.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 24 ago. 2026.

EMBRAPA – Empresa Brasilieira De Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de solos.2013. Brasília, DF.

ENYOH, Christian Ebere; ISIUKU, Beniah Obinna. Characterisation of some soils from flood basin in Amakohia, Owerri, Nigeria. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, v. 102, n. 16, p. 3766-3785, 2022. DOI: 10.1080/03067319.2020.1773455.

ESHETE, H.; DESALEGN, A.; TIGU, F. Knowledge, attitudes and practices on household solid waste management and associated factors in Gelemso town, Ethiopia. PLOS ONE, v. 18, 2023. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278181.

EZE, V. C.; ONWUKEME, V. I.; ENYOH, C. E. Pollution status, ecological and human health risks of heavy metals in soil from some selected active dumpsites in Southeastern, Nigeria using energy dispersive X-ray spectrometer. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2020. DOI: 10.1080/03067319.2020.1772778.

FERRONATO, N.; TORRETTA, V. Waste mismanagement in developing countries: a review of global issues. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 16, n. 6, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph16061060.

KOWALSKA, Joanna Beata; MAZUREK, Ryszard; GĄSIOREK, Michał; ZALESKI, Tomasz. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination: a review. Environmental Geochemistry and Health, v. 40, n. 6, p. 2395–2420, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z.

LAVNITCKI, Laís; BAUM, Camila Angelica; BECEGATO, Valter Antonio. Política Nacional dos Resíduos Sólidos: abordagem da problemática no Brasil e a situação na região sul. Ambiente & Educação: Revista de Educação Ambiental, v. 23, n. 3, p. 379–401, 2018. DOI: https://doi.org/10.14295/ambeduc.v23i3.7783.

MÜLLER, G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. Geo Journal, v. 2, p. 108-118, 1969.

NIEDER, Rolf; BENBI, Dinesh K. Potentially toxic elements in the environment: a review of sources, sinks, pathways and mitigation measures. Reviews on Environmental Health, v. 39, n. 3, p. 561–575, 2024. DOI: https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0161.

OHAERI, Evangelina Ozoemena; IHEME, Callitus; NWAOGU, Linus; ONWEREMADU, Emmanuel. Physicochemical properties of soils from dumpsite in

the Federal University of Technology, Owerri, Nigeria. Asian Journal of Advanced Research and Reports, v. 18, n. 12, p. 405–411, 2024. DOI: https://doi.org/10.9734/ajarr/2024/v18i12837.

OLIVEIRA, Mônica Diene Rodrigues de. Avaliação da contaminação do solo pela disposição inadequada de resíduos sólidos em Romaria-MG. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. DOI: https://doi.org/10.14393/ufu.di.2012.35.

PESSOA, Dihego de Souza. Avaliação de impactos ambientais em áreas de disposição final de resíduos sólidos no semiárido. 2019. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. A dissertação tem 94 páginas e foi defendida em 28 de maio de 2019.

SEMARH - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Disponível em: https://www.cidadao.rn.gov.br. Acesso em: 26 ago. 2026.

SIDDIG, Magboul M. S.; BREVIK, Eric C.; SAUER, Daniela. Human health risk assessment from potentially toxic elements in the soils of Sudan: a meta-analysis. Science of the Total Environment, v. 958, 178196, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178196.

SILVA, Valdenira C. da; CARDOSO, Pedro H. G.; LIMA, Cleidiane G.; CASTRO, Rubens C. de; NOBRE, Crisiana A.; MILHOME, Maria Aparecida. Analysis of the risk of contamination by metals in areas of solid urban waste disposal. Journal of Urban and Environmental Engineering, v. 14, n. 2, p. 244–250, 2020. DOI: https://doi.org/10.4090/juee.2020.v14n2.244--250.

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. Manual de metodos de análise de solo. 2017. 3. ed. rev. e ampl. brasília, df: embrapa.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils: Method 3051A. 1998 CD-ROM.

YATOO, A.; HAMID, B.; SHEIKH, T.; ALI, S.; BHAT, S.; RAMOLA, S.; ALI, M. N.; BABA, Z.; KUMAR, S. Global perspective of municipal solid waste and landfill leachate: generation, composition, eco-toxicity, and sustainable management strategies. Environmental Science and Pollution Research, v. 31, p. 23363–23392, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-024-32669-4.

Anexos



Figura 1- Mapa de localização e pedologia da área do Lixão de São Tomé/RN.



Figura 2- Tabela com valores de referência dos metais avaliados no Lixão São Tomé, considerando o VRQ estadual e a referência local.



Figura 3- Concentrações de metais pesados no solo do Lixão de São Tomé, comparadas ao VRQ estadual e à referência local (escala logarítmica).



Figura 4 - Índices de Poluição por Metal (IMP) calculados com base no VRQ estadual e na referência local. Para o Mn, foi utilizada exclusivamente a referência local.



Figura 5- Índices de Geoacumulação (IGeo) calculados com base no VRQ estadual e na referência local. Para o Mn, foi utilizada exclusivamente a referência local.



Figura 6- Tabela com classificação do Lixão de São Tomé quanto ao índice de poluição (PLI) e ao risco ecológico (RI), considerando o VRQ estadual e a referência local.



Figura 7- Inversão do diagnóstico de poluição (PLI) e risco ecológico (RI) no Lixão São Tomé em função da referência de fundo adotada.



Figura 8 - Risco à saúde humana no Lixão São Tomé: (a) índice de risco não cancerígeno (HI) e (b) risco cancerígeno total (CRt), segundo a via de exposição e o grupo etário.

CÓDIGO: ET1323

AUTOR: MARIA CLARA DA SILVA IRINEU

ORIENTADOR: EVERALDO SILVINO DOS SANTOS

TÍTULO: Produção e envelhecimento de biochar de lignina extraída da casca do coco verde para aplicação na revitalização de solos degradados

Resumo

A fibra de coco verde, resíduo que representa cerca de 80% da massa da fruta e é pouco aproveitado no Brasil, foi utilizada na produção de hidrochar por carbonização hidrotérmica (HTC) em três temperaturas: 200 °C, 250 °C e 300 °C. O rendimento mássico caiu de 81,85% (H200) para 32,71% (H300), relação inversamente proporcional à temperatura. A caracterização química, por hidrólise ácida (protocolo NREL), mostrou degradação progressiva de celulose e hemicelulose e concentração de lignina, que subiu de 38,58% (in natura) para 90,78% (H300), confirmada por FTIR pelo maior grau de aromatização e carbonização. Cada temperatura resultou em um material com aplicação distinta: H200 como adsorvente de poluentes, H250 como condicionador de solo e H300 como precursor de carvão ativado e combustível sólido. A HTC se confirma como rota sustentável de valorização do resíduo, alinhada aos ODS 9, 12 e 13.

Palavras-chave: Carbonização hidrotérmica; Hidrochar; Fibra de coco verde

TITLE: Produção de Hidrochar a partir do reaproveitamento da Fibra de coco verde

Abstract

Green coconut fiber, a residue representing about 80% of the fruit's mass and underexploited in Brazil, was used to produce hydrochar via hydrothermal carbonization (HTC) at 200 °C, 250 °C, and 300 °C. Mass yield decreased from 81.85% (H200) to 32.71% (H300), inversely proportional to temperature. Chemical characterization by acid hydrolysis (NREL protocol) showed progressive degradation of cellulose and hemicellulose and lignin enrichment, rising from 38.58% (raw biomass) to 90.78% (H300), confirmed by FTIR through greater aromatization and carbonization. Each temperature yielded a material with distinct application potential: H200 as a pollutant adsorbent, H250 as a soil conditioner, and H300 as an activated carbon precursor and solid fuel. HTC is confirmed as a sustainable route for valorizing this residue, aligned with SDGs 9, 12, and 13.

Keywords: Hydrothermal carbonization; Hydrochar; Green coconut fiber.

Introdução

O aproveitamento de resíduos agroindustriais é amplamente discutido atualmente, dada a busca do mercado pela redução dos impactos ambientais. Diante disso, a produção e consumo de coco verde se destaca. O Brasil ocupa o ranking de quarto maior produtor de coco mundial (FRÓES JÚNIOR et al., 2019), com destaque para a região do nordeste, responsável por 66,5% da produção nacional (PENHA et al., 2005). Entre os anos de 2014 e 2015, houve um aumento de 15,5% do consumo entre os brasileiros, com uma expectativa de aumento desse consumo em anos futuros (MARTINS et al., 2016).

Contudo, o aumento desse mercado no Brasil tem como consequência a alta produção do resíduo da fruta, gerando um subproduto (casca), que representa cerca de 80% da sua massa total (MARTINS et al., 2016). No ano de 2013, a formação desse resíduo ultrapassou 1,2 milhão de toneladas da produção mundial (FAO STAT, 2016). Uma das principais formas de aproveitamento dessa biomassa é a utilização do substrato no paisagismo, no cultivo de hortaliças, na produção de geotêxteis e na indústria têxtil. Além disso, essa biomassa pode ser empregada como matéria-prima para a produção de biocombustíveis, como bioetanol, biogás e biocarvão, agregando valor ao resíduo e contribuindo para a geração de energia renovável, contudo, no Brasil, entretanto, cerca de apenas 10% do resíduo do volume total é utilizado. (BBC BRASIL, 2014).

A partir disso, o hirochar é produzido a partir da carbonização hidrotérmica (HTC), também chamada de pirólise úmida, representando um meio sustentável, devido ao baixo custo. A carbonização hidrotérmica consiste em um processo termoquímico, que por meio da biomassa e água subscrita, (água que se mantém no estado líquido mesmo em temperaturas de críticas e pressão suficiente para não permitir sua vaporização), em temperaturas que podem variar entre 180 °C e 300 °C e pressões entre 10 bar e 18 bar e tempo de resistência entre 1 hora e 16 horas (MANISCALCO; VOLPE; MESSINEO, 2020).

O Hidrochar apresenta uma vasta variedade em suas aplicações como a o de combustível sólido, a purificação da água, como, remoção de corantes catiônicos, adsorção de metais pesados como Pb^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Cd^{2+} e Ni^{2+}, promove a adsorção dos gases de dióxido de carbono e do metano, age como suporte para catalisadores heterogêneos e auxilia na porosidade e retenção de água e nutrientes para o solo (ISLAM et al., 2022). Dessa forma, o presente estudo encontra motivação em estudar a carbonização hidrotérmica, como uma forma sustentável e alternativa de pré-tratar a biomassa do coco verde. Além disso, pretende-se avaliar a influência da temperatura de processo não apenas nas suas características físico-químicas e estruturais, mas também no rendimento de processo. Além disso, salienta-se que o trabalho abrange pelo menos 3 dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) para 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), sendo eles: indústria, inovação e infraestrutura (ODS 9); consumo e produção responsáveis (ODS 12); ação contra a mudança global do clima (ODS 13). Portanto, o tema da valorização da fibra de coco verde e a produção de hidrochar se tornam temas relevantes para o grupo de pesquisa do LEB, para a UFRN e para a comunidade científica no geral.

Metodologia

Obtenção e Preparo do Coco:
O coco verde foi obtido na praia de Ponta Negra, em Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, em pontos de venda de água de coco. Após a coleta, com o auxílio de um facão, a fibra foi cortada em pequenos pedaços e lavada com água destilada para remover as impurezas. Em seguida, foi seca a 50 °C, por 72 h, em estufa do tipo bandeja, moída foi peneirada com granulometria de 48 mesh.

Processo de carbonização hidrotérmica para obtenção de Hidrochar:
A produção de hidrochar foi realizada por meio do processo de carbonização hidrotérmica (HTC), em um reator tubular. No experimento, foram utilizados 1,5 g de biomassa innatura e 15 ml de água destilada, ambos misturados. A mistura foi transferida para o reator e submetida a aquecimento a diferentes temperaturas (200 °C, 250 °C e 300 °C) no forno mufla, sob pressão autogerada, por uma hora. Após o término do período de reação, o sistema será resfriado até atingir a temperatura segura para a abertura do reator. O sólido obtido será separado da fase líquida por filtração.
O hidrochar produzido foi filtrado e, posteriormente, lavado com 100 ml de acetato de etila, para remover compostos solúveis e resíduos orgânicos. Em seguida, a biomassa foi seca na estufa a aproximadamente 60 °C até atingir massa constante. Após a secagem, o hidrochar foi pesado.Todas as análises foram realizadas em triplicata para garantir a reprodutibilidade dos resultados. O rendimento de cada tratamento hidrotérmico foi calculado pela razão das massas antes de depois da carbonização, como mostra a equação (1).

Determinação dos compostos extrativos da biomassa:
A biomassa e os cartuchos utilizados foram inicialmente secos em estufa a 60 °C por 24 horas. Posteriormente, os cartuchos numerados, secos e vazios foram pesados. Foi pesado 0,03 g da biomassa e inserido no cartucho e, após, submetido à extração com a água a uma temperatura de 100 °C durante o período de duas horas no banho-maria. Depois, após a remoção da água no período estabelecido, o material residual será submetido à extração com álcool etílico a 80 °C por duas horas. Em seguida, o resquício do material será levado à estufa a uma temperatura de 60°C no decorrer de 24 horas, em seguida, será pesado. Todas as análises foram realizadas em triplicata para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

Determinação do teor de cinzas:
Para a produção do da determinação do teor de cinzas, o hidrochar e os cadinhos de porcelana limpos utilizados foi previamente seco em estufa a 60°C no decorrer de 24 horas, até atingir massa constante, a fim de eliminar a umidade residual. Após o resfriamento no dessecador, aproximadamente 0,2 g da amostra seca foi pesada em um cadinho de porcelana. Os cadinhos contendo as amostras foram colocados em uma mufla elétrica previamente aquecida. A temperatura foi elevada gradualmente até 800 °C, permanecendo nessa condição por 2 horas, tempo suficiente para promover a combustão completa da matéria orgânica e a obtenção apenas do resíduo mineral. Após o término da calcinação, os cadinhos foram retirados da mufla e colocados em um dessecador até atingirem a temperatura ambiente. Em seguida, foram novamente pesados em balança analítica. Todas as análises foram realizadas em triplicata para

garantir a reprodutibilidade dos resultados. O teor de cinzas foi calculado pela relação entre a massa do resíduo mineral obtido após a calcinação e a massa inicial da amostra seca, conforme a equação:

Hidrólise ácida da biomassa:
A hidrólise ácida da biomassa foi realizada com o objetivo de promover a degradação da fração lignocelulósica, convertendo os polissacarídeos em açúcares fermentescíveis por meio da ação de um ácido diluído, de acordo com o protocolo da NREL (Sluiter, 2008a, 2008b). Inicialmente, a biomassa foi seca em estufa a 60 °C até atingir massa constante. Em seguida, foi pesado 0,2 g das biomassas in natura, pré-tratadas, hidrochar produzido a 200 °C, 250 °C e 300 °C. Foram utilizados 3 mL de uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 72% e a biomassa foi homogeneizada constantemente no período de uma hora. Em seguida, foram adicionados 84,0 g de água destilada e, agitando-se lentamente, a reação foi interrompida e submetida à autoclave, operando a 121 °C, 1 atm, por 1 hora, condições suficientes para promover a hidrólise parcial da hemicelulose e facilitar a liberação de açúcares. Após o término da reação, o sistema foi resfriado à temperatura ambiente. O hidrolisado foi separado da fração sólida por filtração. A lignina foi separada do filtrado, e este foi utilizado para quantificar os açúcares redutores. Em seguida, a biomassa foi lavada com 200 ml de água destilada. Logo depois, a fração sólida foi levada a uma estufa a 60 °C por 24 horas. A fração líquida obtida foi armazenada sob refrigeração (4 ºC) para determinação da concentração de açúcares redutores, enquanto a fração sólida residual retida no filtro foi lavada com 250 mL de água destilada, seca em estufa a 60 °C, por 24 h. A determinação da fração de lignina insolúvel presente na amostra foi realizada conforme a equação (4).

A quantificação dos açúcares foi realizada por CLAE, utilizando a coluna Shim-Pack SCR-101H (Shimadzu Co. Japan) para determinar principalmente glicose e xilose, usando ácido sulfúrico (5,0 mM) como fase móvel, a 50ºC, de forma isotérmica e isocrática, sob fluxo de 0,6 mL/min. Na determinação de HMF e furfural, se utilizou a coluna Shim-Pack CLC-ODS (Shimadzu Co. Japan), tendo como fase móvel ácido acético (AA) (1,0%) e acetonitrila (ACN) a 25ºC, e fluxo de 0,6 mL/min em gradiente: AA 100% - ACN 30% (0-5 min); ACN 30% - 70% (5-10 min); ACN 70% - 100% (10-15 min); ACN 100% - AA 100% (15-25 min). A fim de se determinar a concentração de celulose e hemicelulose (Eq. 6), soma-se à quantidade de açúcares corrigida, com seus respectivos fatores de conversão, apresentados na Tabela 1.

Resultados e Discussões

A fibra de coco verde não tratada (in natura) e os hidrochars produzidos foram caracterizados em termos de polissacarídeos (celulose, hemicelulose), lignina insolúvel, extraíveis e cinzas, seguindo os protocolos da NREL . Os valores obtidos são apresentados na Tabela 2.

Rendimento mássico

A produção do hidrochar obtido por carbonização hidrotérmica apresentou redução do rendimento à medida que a temperatura aumentava. Dessa forma, observou-se que o H200 obteve rendimento de 81,85%; o resultado se deu porque houve degradação parcial da biomassa, conservando, assim, em sua maioria, os compostos estruturais presentes nela. Na produção a 250 °C, obteve-se o rendimento de 47,25%, principalmente, em decorrência de uma maior desidratação, descarbonização e despolimerização da celulose e hemicelulose, tendo como consequência a queda significativa do valor de massa sólida após o processo de HTC. Da mesma maneira, o hidrochar obtido através do tratamento térmico de 300 °C, atingiu o valor de 32,71%, proporcionado pela alta decomposição térmica e solubilização de boa parte dos componentes da biomassa em fase líquida e gasosa.

Teor de celulose e hemicelulose

Os valores obtidos para celulose e hemicelulose ao longo do tratamento térmico no HTC demonstram a sensibilidade da holocelulose à temperatura.

Na biomassa innatura, a celulose representou 26,15%, enquanto o H200 obteve 32,90%, enquanto a hemicelulose se manteve praticamente inalterada entre as duas amostras analisadas. O aumento do teor de celulose se deu devido, principalmente, à remoção dos extraíveis e à holocelulose possuir uma certa resistência nessa determinada faixa de temperatura (WANG et al., 2021); assim, foi possível observar um rearranjo percentual de composição da biomassa. No H250, o teor de celulose foi reduzido para 21,31% e o de hemicelulose caiu de 6,89% (in natura) para 5,03%, devido a intensificação da hidrólise ácida causada pela íons hidrônios formado in situ pela água presente no ambiente, e também pela liberação de ácidos orgânicos, esses ácidos são capazes de catalisar a clivagem das ligações glicosídicas -β-1,4 em temperaturas elevadas, nesse sentido, o mesmo acontece para o H300 com o valor de 6,49% e da hemicelulose de 3,34%, por causa da alta temperatura. Esse perfil ocorre, pois os oligossacarídeos, principalmente a hemicelulose, representam parte da lignocelulósica termicamente menos estável, tornando-se os primeiros a se degradar até em temperaturas mais baixas (De Araújo et al., 2025).

Produção de extraíveis

A biomassa in natura apresentou um alto teor de de extraíveis, cerca de 22,99% composto por ceras, compostos fenólicos e açúcares, resina e compostos fenólicos, e açúcares livre. Através do tratamento hidrotérmico, promoveu-se a remoção desses componentes nos hidrochars de 200 °C, 250 °C e 300 °C. Assim, é possível observar a diminuição consecutiva nos valores dos extraíveis dos hidrochars produzidos, cerca de 17,12% presente no hidrochar de 200 ºC, 10,58% no hidrochar produzido a 250 °C e 2,88% no hidrochar de 300 °C. Essa redução nos valores de extraíveis demonstra a solubilização e degradação térmica de compostos orgânicos não estruturais na fase aquosa na carbonização hidrotérmica (WANG et al., 2021).

Teor de Cinzas Totais

Através desse processo, foi possível observar que a parte inorgânica manteve-se em valores reduzidos, com variação de 0,38% a 1,30% . A redução de 0,41% no valor das cinzas com a biomassa pré-tratada e nos valores do hidrochar de 200 °C e 250 °C, em comparação com a biomassa in natura, ocorre devido à formação de compostos polares iônicos, causada pela água submetida ao processo (CHENG et al., 2021). O pequeno aumento no valor do hidrochar a 300 °C se deveu à concentração de calcinantes, decorrente da perda de voláteis dos compostos orgânicos em altas temperaturas.

Lignina Insolúvel

Na biomassa in natura, a lignina representa 38,58%. O aumento da temperatura nos hidrochars está diretamente associado ao aumento da lignina. O hidrochar de 200 °C obteve 42,65%; o de 250 °C, 64,56%; e, em seguida, o de 300 °C, 90,78%. Isso está relacionado com a degradação e a hidrólise quase completa das partes da hemicelulose e da celulose degradadas pela alta temperatura, enquanto a lignina apresenta uma maior resistência térmica (De Araújo et al., 2025). Com isso, o aumento percentual da lignina torna-se cada vez mais proeminente, uma vez que resiste a altas temperaturas.

FTIR

Os espectros de FTIR (Figura 1) mostram diferenças à medida que a temperatura de carbonização aumenta. Na região de 3200 a 3500 cm^{-1}, referente ao estiramento O-H, a banda está presente nas três amostras, sendo mais larga na amostra de 200 °C, enquanto, nas amostras de 250°C e 300 °C, ela se apresenta mais estreita. Isso pode indicar uma mudança no ambiente químico dos grupos hidroxila com o aumento da temperatura, associada às reações de desidratação que ocorrem durante a carbonização (Handika et al., 2026). Próximo a 2900 cm^{-1} aparece um pico estreito, atribuído a CH e CH_2 alifáticos, presente em todas as temperaturas , sem diferenças relevantes de formato ou posição, possivelmente advindas de extrativos residuais e de cadeias alifáticas da lignina (Liu; He; Uchimiya, 2015).

Entre 1600 e 1750 cm^{-1} aparecem vários picos sobrepostos, atribuídos a carbonilas e carboxilas, ligadas à hemicelulose degradada e a produtos de desidratação, além de C=C de anéis aromáticos da lignina (Shan et al., 2022). A banda próxima a 1030-1050 cm^{-1}, referente ao C-O-C e ao C-O da celulose e da hemicelulose, está presente nas três amostras, mas apresenta menor intensidade em relação às demais bandas do espectro à medida que a temperatura aumenta (Koveria et al., 2025). Isso é compatível com a degradação progressiva da fração de polissacarídeos à medida que a temperatura aumenta, um dos indicadores característicos da hidrocarbonização (Volpe et al., 2020). Dessa forma, os espectros de FTIR das amostras sugerem que, quanto maior a temperatura, maior o grau de aromatização e de carbonização em relação ao material obtido a 200°C, corroborando os estudos já presentes na literatura.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que os hidrochars produzidos apresentam composições químicas que variam em função da temperatura de produção (Petrović et al., 2024). Com isso, as aplicações em diferentes contextos, a depender de suas características físico-químicas, surgem como uma alternativa promissora para a indústria. O hidrochar tratado a 300 °C (H300) apresenta o maior teor de lignina/pseudo-lignina e o menor teor de extraíveis, podendo ser utilizado como precursor do carvão ativado (Jalilian et al., 2024). A sua estrutura constituída por anel

aromático permite o desenvolvimento de microporosidades no processo de ativação química-física, simultaneamente, devido a baixa concentração de compostos voláteis diminui a formação do alcatrão e favorece o rendimento do carbono mais estável. Nesse mesmo sentido, o material produzido também é indicado para a utilização de combustíveis sólidos (Wu et al., 2023), visto que a perda do grupo oxigenado ao longo do processo de carbonização hidrotérmica afeta o poder calorífico, tornando o hidrochar com características energéticas semelhantes às do carvão mineral. Nessa perspectiva, o H300 demonstra ser um condicionador de solo favorável, uma vez que pode ser utilizado para o sequestro de carbono a longo prazo, devido à combinação microbiana, desempenhando o mesmo papel exercido pelo biochar. O hidrochar produzido a 250 °C (H250), por ser constituído por grupos funcionais oxigenados e por apresentar alto teor de extraíveis, pode ser utilizado como um bom condicionador de solo de uso ativado, utilizado para a retenção de água e nutrientes sem apresentar riscos de fitotoxicidade ao se comparar com materiais que apresentam um menor grau de carbonização (Celletti et al., 2021). Para o hidrochar produzido à 200°C (H200), o grupo de hidroxilas e polissacarídeos que não foram deteriorado no processo térmico tem o potencial de adsorção seletiva de poluentes com materiais mais pesados em razão ao grupo funcional de carboxílicos e hidroxílicos presentes na superfície, a partir do momento que se tenha passado com antecedência pelo processo de remoção de extraíveis, que possuí o objetivo principal de reduzir o risco de fitotoxicidade em casos de aplicação com contato com o solo e a água (Islam et al., 2022).

A variação de temperatura na produção de hidrochar pode atuar como um dos parâmetros para a obtenção de diferentes propriedades a partir da biomassa do coco verde. Desta maneira, é possível definir a temperatura de processo, com base nas características e no grupo funcional desejados, de acordo com a sua aplicação industrial, como a obtenção de condicionantes de solo, biocombustíveis sólidos e adsorventes ativados. A carbonização hidrotérmica se mostrou eficaz para transformar a composição química da fibra de coco verde, com efeitos claros da temperatura sobre celulose, hemicelulose, lignina e extraíveis. O aumento da temperatura promoveu a degradação progressiva dos polissacarídeos e a elevação da concentração relativa de lignina no material, atingindo 90,78% no hidrochar a 300 °C, resultado corroborado pelos espectros de FTIR. Essas diferenças na composição físico-química fazem com que cada hidrochar possa ter uma aplicação industrial distinta, com base nas suas características. O hidrochar produzido em temperatura mais alta (300 °C) pode ser utilizado como precursor de carvão ativado, combustível sólido e condicionador de solo para sequestro de carbono; o H250, como condicionador de solo por retenção de água e nutrientes; e o H200 (temperatura mais branda), como adsorvente seletivo de poluentes, devido ao maior teor de grupos hidroxílicos preservados. Assim, a temperatura de carbonização se confirma como um dos principais fatores para estabelecer as propriedades do hidrochar da fibra de coco verde a diferentes finalidades industriais e ambientais, reforçando o potencial da HTC como rota sustentável de valorização desse resíduo agroindustrial.

Conclusão

Diante do exposto, é notório que por meio da carbonização hidrotérmica (HTC) fez-se eficaz para o pré-tratamento e valorização do coco verde, proporcionando mudanças

físicas e químicas da biomassa, tanto em seu rendimento mássico proporcionado ao decorrer da elevação da temperatura. Foi possível observar a relação inversamente proporcional da temperatura e rendimento, enquanto o hidrochar formado à 200 obteve-se o rendimento de 81,85%, por consequência da alta temperatura foi reduzido à 47,25% no hidrochar de 250 e 32,71% no hidrocha de 300. Por meio deste, é possível observar que com o aumento da temperatura favorece as reações de desidratação, despolimerização da celulose e hemicelulose e descarbonização.A perda de massa ao decorrer do crescimento da temperatura tem como consequência transformações na estrutura química, facilitando a degradação de polissacarídeos como observados nos valores obtidos da celulose do H200 de 32,90%, H250 de 21,31% e H300 de 6,49%. O mesmo processo de queda dos dados obtidos da hemicelulose desde a biomassa in natura de 6,89%, a H200 de 6,43%, a H5,03% e a H300 de 3,34%. Por consequência, mostrou-se evidente a concentração reativa de lignina de 90,78% no H300, também se destaca a redução da concentração dos extraíveis presentes, relacionado com a degradação térmica e solubilização dos compostos orgânicos não estruturais. Da mesma forma, o teor de cinzas manteve se reduzido durante o processo de variação de temperatura, nesse sentido, os dados de FTIR mantiveram-se coerentes diante deste conjunto de resultados, apontando um maior grau de aromatização e carbonização nos hidrochas produzidos a partir de temperaturas mais elevadas.

Por esses motivos, o debate acerca da temperatura de carbonização está diretamente relacionado com o rendimento mássico das propriedades físico-químicas. O H200, expressou maior rendimento do processo, isso acarretou o maior número de grupos hidroxílicos, tornando-se conveniente para a utilização de adsorvente seletivo de poluentes. O H250, demonstrou-se ideal para a utilização e condicionador de solo por retenção de água e nutrientes. O H300 apesar de possuir menor rendimento, apresentou elevadas taxas de lignina, sendo ideal para a produção de carvão ativado, combustível sólido e condicionador de solo para o sequestro de carbono. Portanto, a decisão de determinada faixa de temperatura deve ser considerado, por apresentar diferentes propriedades física e química desejadas, e também a viabilidade econômica diretamente relacionada com o rendimento, por esses motivos, reforça-se o potencial da carbonização hidrotérmica como caminho sustentável para a valorização da fibra do coco verde simultaneamente com os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS 9, 12 e 03).

Referências

ARAGÃO, Fernando Antônio Souza de et al. (ed.). A cultura do coqueiro no Brasil. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/389476. Acesso em: 2 jun. 2026.

BBC BRASIL. O desafio do descarte do coco verde nas praias brasileiras.BBC News Brasil, [s. l.], 14 maio 2014. Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/05/140514_lixo_coco_an. Acesso em: 2 jun. 2026.

CELLETTI, S.; BERGAMO, A.; BENEDETTI, V.; PECCHI, M.; PATUZZI, F.; BASSO, D.; BARATIERI, M.; CESCO, S.; MIMMO, T. Phytotoxicity of hydrochars obtained by hydrothermal carbonization of manure-based digestate. Journal of Environmental Management, v. 280, p. 111635, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111635

DE ARAÚJO, B. M. C.; NUNES, J. S.; DA COSTA FILHO, J. D. B.; DE SANTANA SOUZA, D. F.; DE ARAÚJO PADILHA, C. E.; DOS SANTOS, E. S. Adding-Value to Green Coconut Fiber by Producing Lignosulfonate for Enhancing the Sugar Release in Enzymatic Hydrolysis. Waste and Biomass Valorization, v. 16, n. 10, p. 5561–5572, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12649-025-03018-4

ISLAM, M. T.; SULTANA, A. I.; CHAMBERS, C.; SAHA, S.; SAHA, N.; KIRTANIA, K.; REZA, M. T. Recent Progress on Emerging Applications of Hydrochar. Energies, v. 15, n. 24, p. 9340, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en15249340

JALILIAN, M.; BISSESSUR, R.; AHMED, M.; HSIAO, A.; HE, Q. S.; HU, Y. A review: Hydrochar as potential adsorbents for wastewater treatment and CO2 adsorption. Science of The Total Environment, v. 914, p. 169823, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169823

PETROVIĆ, J.; ERCEGOVIĆ, M.; SIMIĆ, M.; KOPRIVICA, M.; DIMITRIJEVIĆ, J.; JOVANOVIĆ, A.; JANKOVIĆ PANTIĆ, J. Hydrothermal Carbonization of Waste Biomass: A Review of Hydrochar Preparation and Environmental Application. Processes, v. 12, n. 1, p. 207, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/pr12010207

SHAN, X.-K.; ZHAO, S.-L.; MA, Y.-Y.; MO, W.; WEI, X.-Y. Analysis of Pyrolysis Performance and Molecular Structure of Five Kinds of Low-Rank Coals in Xinjiang Based on the TG-DTG Method. ACS Omega, v. 7, n. 10, p. 8547–8557, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06350

SLUITER, A. Determination of Extractives in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP); Issue Date 7/17/2005. Technical Report, 2008 a.

SLUITER, A. Determination of Ash in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP); Issue Date: 7/17/2005. Technical Report, 2008 b.

WU, S.; WANG, Q.; CUI, D.; SUN, H.; YIN, H.; XU, F.; WANG, Z. Evaluation of fuel properties and combustion behaviour of hydrochar derived from hydrothermal carbonisation of agricultural wastes. Journal of the Energy Institute, v. 108, p. 101209, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101209

Anexos



Equação 1



equação (2)



equação (3)



equação (4)



tabela 1



equação (5)



equação (6)



tabela 2

CÓDIGO: ET1347

AUTOR: DÉBORA RAQUEL DE ARAÚJO SILVA

ORIENTADOR: THIAGO CHELLAPPA

TÍTULO: Entrevistar Pesquisadores da Área de Engenharia de Energia

Resumo

Este trabalho apresenta as ações realizadas pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) por meio do projeto de pesquisa “Minuto Sustentável”, transmitido pela Rádio Universitária. A iniciativa utiliza o meio radiofônico para abordar questões relacionadas à sustentabilidade, às mudanças climáticas e à preservação do meio ambiente, levando ao público conteúdos fundamentados em conhecimentos científicos. A proposta consiste em transformar informações produzidas no âmbito acadêmico em materiais objetivos e de fácil compreensão, favorecendo o diálogo entre ciência e sociedade. Os conteúdos apresentados contemplam diferentes aspectos da problemática ambiental, destacando a importância da preservação dos ecossistemas, do uso responsável dos recursos naturais e da adoção de atitudes conscientes diante dos impactos causados pelas atividades humanas. Nesse sentido, o projeto demonstra o potencial da comunicação científica como instrumento de sensibilização social. As ações desenvolvidas contribuem para ampliar a compreensão sobre os desafios ambientais atuais, estimular a reflexão da população e fortalecer a participação coletiva na busca por práticas mais responsáveis e sustentáveis.

Palavras-chave: Sustentabilidade. pesquisa Universitária. Educação Ambiental.

TITLE: Interviewing Researchers in the Field of Energy Engineering

Abstract

This work presents the activities carried out by the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN) through the research project “Minuto Sustentável” (Sustainable Minute), broadcast by the University Radio. The initiative uses radio communication to address issues related to sustainability, climate change, and environmental preservation, providing the public with content based on scientific knowledge. The project aims to transform information produced within the academic environment into clear and accessible materials, encouraging dialogue between science and society. The topics covered include different aspects of environmental challenges, highlighting the importance of ecosystem preservation, the responsible use of natural resources, and the adoption of conscious attitudes toward the impacts caused by human activities. In this context, the project demonstrates the potential of science communication as a tool for social awareness. The activities contribute to a broader understanding of current

environmental challenges, encourage public reflection, and strengthen collective participation in the pursuit of more responsible and sustainable practices.

Keywords: Sustainability.University Research. Environmental Education.

Introdução

O futuro é um bem público comum ainda não existente, mas com valor potencial. Não pode ser medido e não pode ser avaliado em si mesmo. Só pode ser medido e avaliado pelo seu passado, ou seja, pelo que fazemos agora. Como a água ou o ar, o futuro pode ser melhor ou pior de acordo como o tratamos agora. O futuro como bem público é uma mescla de insumos tangíveis e intangíveis que são o resultado da forma como utilizamos o capital natural. Essa "forma" como as sociedades se apropriam do capital natural compreende as relações sociais, as estruturas e relações políticas entre indivíduos e Estados e o próprio acervo cultural no qual estamos imersos. A história humana produziu, até agora, um amplo conjunto de conhecimentos, bens e tecnologias, que por terem sido acumulados, os consideramos como resultados do progresso. Mas a cultura, com seus bens tangíveis e intangíveis acumulados, também deixou sua marca neste processo. A humanidade desenvolveu inúmeras atividades que tiveram como resultado a modificação das paisagens, através do desmatamento e da queima dos bosques naturais, a interferência no ciclo hidrológico e a extinção de espécies vegetais e animais, provocando profundas cicatrizes no planeta. Desde o século XIX, muitos pensadores reconheceram a gravidade da situação e expressaram a preocupação com o que desde então vem sendo chamado de "limites do planeta". Adotar estilos de vida que acentuem a qualidade de vida e subsistência material num mundo finito. Avançar o estudo da sustentabilidade ecológica e promover o intercâmbio aberto e aplicação ampla do conhecimento adquirido. Apoiar a cooperação científica e técnica internacional relacionada à sustentabilidade, com especial atenção às necessidades das nações em desenvolvimento. Reconhecer e preservar os conhecimentos tradicionais e a sabedoria espiritual em todas as culturas que contribuem para a proteção ambiental e o bem-estar humano. Garantir que informações de vital importância para a saúde humana e para a proteção ambiental, incluindo informação genética, permaneçam disponíveis ao domínio público. Seguindo padrões de ideias, em conformidade com tradição consolidada e atuante nas universidades latino-americanas e brasileiras, concebe-se uma tríade: Ensino, Pesquisa e Extensão como constituintes necessariamente interdependentes da prática acadêmica, que se retroalimentam e promovem o desenvolvimento entre si, para o conjunto da universidade e para a sociedade – local, regional e nacional. O Programa de Rádio "Minuto Sustentável" veio à tona como uma parceria com a Superintendência de Comunicação da UFRN. Possui como parte de sua missão produzir, gerir e difundir informações qualificadas sobre a questão da Sustentabilidade em nosso dia a dia, além de promover ações que buscam ampliar a cobertura desta em benefício da população do país. Para contribuir nessa missão matérias e boletins de rádio, com o objetivo de divulgar conhecimento e ações relacionadas com a conservação e o aproveitamento sustentável. Os conteúdos são produzidos semanalmente em linguagem acessível aos mais diversos públicos e veiculados por meio do Minuto Sustentável, quadro fixo do programa de rádio da Superintendência de Comunicação da UFRN.

Metodologia

A execução desta proposta fundamentou-se em um levantamento de dados e relatórios científicos contemporâneos acerca da situação climática mundial, das crises socioambientais e dos eventos extremos que marcam a atualidade, servindo como embasamento teórico e prático indispensável para a elaboração do roteiro de coleta de informações sobre sustentabilidade em âmbito global e local. Desse modo, foi possível cumprir com absoluto êxito o primeiro objetivo geral do projeto, fundamentando de maneira sólida a intervenção participativa com foco em contextos de importância ambiental e econômica, estruturando um esquema teórico abrangente para a atuação voltada ao desenvolvimento de alto desempenho e garantindo a pertinência científica das informações trabalhadas pela equipe. Por intermédio do Programa de Rádio Minuto Sustentável, a difusão cotidiana e semanal do conteúdo estruturou as aberturas e os primeiros parágrafos de cada edição de modo a sintetizar, com precisão cirúrgica e dinamismo, os temas principais que seriam debatidos ao longo de toda a programação. Essa estratégia comunicativa inicial foi cuidadosamente desenhada para capturar, prender e reter de imediato a atenção do ouvinte, empregando técnicas de linguagem acessível, atraente e persuasiva que funcionavam como um panorama instigante para introduzir os fatos de maior relevância socioambiental. Em complemento direto a essa dinâmica de atração, a estruturação dos episódios contemplou de forma muito marcante, em sua etapa final, uma análise crítica aprofundada sobre as consequências severas, os desdobramentos complexos e os impactos diretos que tais acontecimentos socioambientais causam cotidianamente na comunidade, na sociedade em geral e nos ecossistemas. Esse encerramento estratégico não apenas destacava com veemência a urgência absoluta de conscientizar a população e reverter esses cenários críticos de degradação, mas também abria espaço para apontar caminhos práticos, alternativas viáveis, soluções sustentáveis e formas concretas de contribuição para a melhora e mitigação dos problemas abordados, estimulando ativamente a participação cidadã e o engajamento coletivo. Os sistemas de informação integraram um conjunto robusto e consolidado de dados quantitativos e qualitativos obtidos de forma sistemática por meio de todas as edições e atividades desenvolvidas ao longo da vigência do programa Minuto Sustentável. O acompanhamento rigoroso das etapas, dos desdobramentos operacionais e dos resultados alcançados seguiu um processo avaliativo contínuo e estruturado, voltado permanentemente ao alinhamento de metas, à análise minuciosa dos métodos aplicados na prática e à verificação constante do percurso das atividades extensionistas, ancorando toda a execução no eixo programático indissociável entre o ensino, a pesquisa e a extensão. Por meio desse percurso metodológico reflexivo, atingiu-se plenamente o segundo objetivo geral estipulado, desenvolvendo de maneira efetiva conhecimentos, atitudes e valores que favoreceram fortemente a formação de uma cultura cônscia, crítica e coletiva em favor intransigente da conservação ambiental, da preservação e da gestão adequada dos recursos naturais. As atividades operacionais pautaram-se na discussão prévia, democrática e horizontal das interfaces do projeto, otimizando de forma significativa o cronograma de execução e estimulando continuamente a troca mútua de saberes entre os discentes e os docentes envolvidos. No âmbito específico de suas respectivas áreas de formação e atuação, a equipe integrou-se de maneira direta e ativa na pesquisa de base, na organização sistemática dos dados coletados, na elaboração detalhada dos conteúdos jornalísticos veiculados no programa de rádio e na produção textual complementar destinada à difusão do conhecimento. A transversalidade temática integrou com sucesso a atuação de uma equipe altamente interdisciplinar e interprofissional, unindo de forma sinérgica o ensino, a pesquisa e a extensão em um processo contínuo, articulado e ininterrupto de produção, apropriação e

difusão do conhecimento. Essa engrenagem voltou-se diretamente à consolidação de um saber científico de caráter popular, emancipatório e formador da consciência coletiva e individual. Essa articulação prática concretizou com total êxito o último objetivo geral de meta-nível, materializando o chamado "compromisso não dualista" que conecta de maneira coesa e recíproca a teoria com a prática, reconhecendo e celebrando o enriquecimento mútuo que se estabelece permanentemente entre estas duas facetas fundamentais do nosso modo de conhecer, compreender e transformar ativamente a realidade do mundo.

Resultados e Discussões

A operacionalização prática das atividades desenvolvidas ao longo deste projeto estruturou-se por meio de um fluxo de trabalho dinâmico, contínuo, exaustivo e estritamente colaborativo entre os participantes, desenhado para viabilizar a materialização dos objetivos propostos na proposta de extensão. A execução cotidiana desse percurso revelou detalhadamente, na prática, como o planejamento teórico inicial converteu-se em uma produção comunicativa, jornalística e educativa altamente efetiva, dando forma concreta aos propósitos educacionais, sociais e ambientais da iniciativa. Esse panorama prático permitiu mensurar com precisão o alcance das ações desenvolvidas, observar o engajamento coletivo e certificar de que maneira a articulação sinérgica entre os membros da equipe viabilizou a entrega consistente de todos os produtos previstos ao longo da vigência do projeto.

O processo de criação iniciava-se rotineiramente com o envio, por parte do professor orientador, de um conjunto amplo, diversificado e atualizado de notícias, reportagens e boletins informativos acerca da situação climática global e local, contemplando a ocorrência de eventos extremos, desastres ambientais, debates geopolíticos sobre o clima e as crises socioambientais contemporâneas que afetavam diretamente tanto o cenário internacional quanto a realidade das comunidades. A partir desse acervo inicial de informações brutas, realizava-se sistematicamente uma leitura crítica, um debate aprofundado e uma filtragem minuciosa para identificar e selecionar os acontecimentos dotados de maior grau de impacto, relevância social e urgência informativa para a atualidade. Esse crivo analítico era indispensável para filtrar o excesso de informações e reter apenas aquilo que detinha verdadeiro valor jornalístico e pedagógico para o público-alvo da iniciativa.

Os fatos selecionados por meio dessa curadoria inicial eram, então, organizados criteriosamente por ordem de prioridade temática, estabelecendo com clareza o que de mais urgente precisava ser pautado, debatido e divulgado — processo de organização e envio das pautas prioritárias realizado pelo docente que pode ser visualizado na Figura 1 – Exemplo da ordem de prioridade de pautas enviada pelo professor orientador. Essa lista priorizada era devolvida para uma rodada de validação conceitual e técnica, etapa fundamental que assegurava o rigor, a veracidade, a isenção e a pertinência absoluta do material que seria desenvolvido nas etapas subsequentes, evitando distorções conceituais ou abordagens superficiais sobre temas científicos complexos.

Com a priorização de pautas devidamente estabelecida e aprovada pelo docente, iniciava-se propriamente a fase dedicada à escrita dos roteiros. Os textos exigiam um esforço minucioso de adaptação da linguagem científica e jornalística para o formato falado, sendo redigidos seguindo estritamente o modelo formal, o tom adequado e a estrutura exigida pelas normas do veículo de comunicação utilizado, a exemplo do modelo visualizado na Figura 2 – Exemplo de roteiro do Minuto Sustentável (elaborado

por Débora Raquel e colaboradores). Essa etapa demandava atenção redobrada à concisão, à clarificação na exposição dos fatos, à coerência argumentativa e à fluidez da leitura, uma vez que o produto final seria veiculado em áudio para ouvintes com diferentes níveis de familiaridade com as temáticas socioambientais.

Concluída essa fase de redação inicial do roteiro, o material não seguia direto para a gravação; ele era encaminhado novamente ao professor orientador para uma rodada profunda de revisão textual, apontamento de desvios, refinamento de ideias, correções gramaticais, estilísticas e estruturais, e a validação final. Esse ciclo de idas e vindas do texto assegurava uma qualidade técnica irrepreensível, garantindo a coesão, a correção informativa e a precisão técnica do roteiro antes de sua consolidação definitiva para a etapa de veiculação no ar. Esse crivo pedagógico constante funcionava como um espaço permanente de formação prática para os participantes envolvidos na redação.

Essa dinâmica ininterrupta e cíclica de produção, envio, análise de prioridades, escrita, revisão e correção permitiu avaliar de perto os resultados alcançados ao longo de todo o percurso metodológico e prático do projeto. Ficou evidente o envolvimento ativo, o aprimoramento técnico progressivo e o aprendizado prático vivenciado na elaboração cotidiana dos conteúdos jornalísticos veiculados. O engajamento constante na seleção de pautas prioritárias, na escrita reflexiva e na discussão aprofundada sobre os impactos socioambientais promoveu uma riquíssima troca contínua de saberes entre os integrantes da equipe e o docente orientador.

Esse esforço conjunto e sistematizado transformou o conhecimento acadêmico abstrato e as complexas pautas científicas sobre as mudanças climáticas em um produto radiofônico dinâmico, acessível e de forte impacto comunitário e social, a exemplo da temática voltada ao garimpo ilegal abordada no roteiro ilustrado na Figura 3 – Exemplo de roteiro do Minuto Sustentável sobre garimpo ilegal. A recepção e a repercussão dessas transmissões demonstraram uma capacidade real de dialogar de maneira direta com a realidade cotidiana dos ouvintes, conseguindo desmistificar conceitos complexos, despertar o senso crítico da comunidade e fomentar ativamente a conscientização pública a respeito das graves problemáticas climáticas que marcam o século XXI, consolidando o papel transformador da extensão universitária na sociedade.

Conclusão

A concretização deste projeto evidenciou o impacto profundo que a comunicação radiofônica universitária exerce na articulação entre saberes acadêmicos e as demandas urgentes da comunidade. Ao focar os esforços na produção contínua de conteúdos e notícias voltados para o Programa de Rádio Minuto Sustentável, a iniciativa abriu um canal direto de diálogo com os ouvintes, transformando pautas climáticas complexas em debates acessíveis, fundamentais para a conscientização pública sobre os rumos do meio ambiente e as transformações globais que afetam o cotidiano de todos. Para a trajetória pessoal e acadêmica, a experiência transcendeu largamente o espaço tradicional da sala de aula, exigindo uma postura de constante investigação e escuta atenta da realidade. O processo regular de apurar fatos, estruturar notícias e redigir textos moldou a capacidade de analisar criticamente o papel da mídia na sociedade contemporânea. Tornou-se evidente na prática como dar voz a temáticas socioambientais muitas vezes negligenciadas, percebendo que a informação bem apurada e transmitida com clareza

possui um imenso poder de mobilização e transformação social. Essa vivência consolidou a convicção de que a extensão universitária cumpre o seu verdadeiro propósito quando capacita o estudante a utilizar a palavra e os meios de comunicação de forma ética, assertiva e engajada. O envolvimento direto com a produção radiofônica não apenas aprimorou a escrita e a desenvoltura técnica, mas também expandiu a visão de mundo, mostrando que a universidade e a sociedade civil podem e devem caminhar juntas na busca por soluções coletivas. O legado deste projeto permanece vivo na certeza de que cada notícia veiculada e cada espaço de diálogo aberto na rádio representam um passo adiante na construção de uma cidadania mais consciente, participativa e comprometida com a sustentabilidade do planeta.

Referências

ALTWICKER, E.R.; CANTER, L.W.; CHA, S.S.; CHUANG, K.T.; LIU, D.H.F.; RAMACHANDRAN, G.; RAUFER, R.K.; REIST, P.C.; SANGER, AL.R.; TURK, A.; WAGNER, C.P. Air Pollution. In: ALLER, M. Environmental Engineer's Handbook. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC,1999. ÁLVARES JUNIOR, O.M.; LACAVA, C.I.V.; FERNANDES, P.S. Emissões Atmosféricas. Brasília: SENAI/DN, 2002. 373 p. BADRE, A.N. Shaping web usability. Boston: Addison-Wesley, 2002. BELTRÃO, N. E. M. O Agronegócio do Algodão no Brasil. Campina Grande: EMBRAPA, 1999. v. 1. BROMHAM, L.L., Dinnage, R., Hua, X. (2016). Interdisciplinary research has consistently lower funding success, Nature, Vol 534, 30 June. DABDOUB, M.J.; BRONZEL, J.L.; RAMPIN, M.A. Biodiesel: Visão Crítica do Status Atual e Perspectivas na Academia e na Indústria. Química Nova, v. 32, n.3, p. 776-792, 2009. FENGER, J. Air pollution in the last 50 year – from local to global. Atmospheric Environment, v. 43, p. 13-22, 2009. FISK A. D., ROGERS, Wendy, A., CHARNESS, Neil, CZAJA, Sara J e SHARIT, Jopseph. Designing for older adults. London: Editora CRC Press, 2004. KUNIAVSKY, M. Observing the user experience: A practitioner´s guide to user research. San Francisco: Morgan Kaufamann, 2003.

Anexos



Figura 1



Figura 2



Figura 3

CÓDIGO: ET1358

AUTOR: MARIA STEPHANIE RODRIGUES PEREIRA

COAUTOR: JENNEFER KELLY DE LIMA SANTOS

ORIENTADOR: RICARDO PIRES DE SOUZA

TÍTULO: Transformação Digital e Engenharia de Produção na Gestão da Saúde: Otimizando através de BPM, RPA e IA para a Sustentabilidade Institucional

Resumo

Este estudo analisa a modernização dos processos de gestão na Secretaria de Estado da Saúde Pública do Rio Grande do Norte (SESAP/RN), no âmbito do projeto DIMP, focando na gestão de manutenção hospitalar e aquisições. Diante de desafios como a reatividade operacional e a fragmentação de dados, aplicaram-se metodologias de Engenharia de Produção, incluindo Gerenciamento de Processos (BPM), Automação Robótica (RPA) e apoio à decisão (FITradeoff). A modernização da manutenção foi alicerçada em uma minuta contratual padronizada (Lei 14.133/2021), vinculando pagamentos a indicadores de desempenho (KPIs). Em aquisições, o uso de Python e Selenium reduziu o ciclo de consolidação de notas de 480 min para 9 min. Os resultados demonstram que a digitalização, alinhada aos ODS 3, 8, 10, 11 e 17, promove eficiência e resiliência no sistema de saúde pública.

Palavras-chave: Engenharia de Produção; BPM; Automação RPA; Manutenção; Saúde Pública.

TITLE: Digital Transformation and Industrial Engineering in Public Health Management: Optimizing Maintenance through BPM, RPA, and AI for Institutional Sustainability

Abstract

This study analyzes the modernization of management processes at the Rio Grande do Norte State Department of Public Health (SESAP/RN) under the DIMP project, focusing on equipment maintenance and procurement. Facing challenges such as operational reactivity and data fragmentation, Industrial Engineering methodologies were applied, including BPM, Robotic Process Automation (RPA), and multi-criteria decision-making (FITradeoff). Maintenance modernization relied on a standardized contract model, linking payments to performance indicators (KPIs). In procurement, automation using Python and Selenium reduced the invoice consolidation cycle from

480 minutes to 9 minutes. Results demonstrate that digitization, aligned with SDGs 3, 8, 10, 11, and 17, promotes administrative efficiency and healthcare resilience.

Keywords: Industrial Engineering; BPM; Automation RPA; Maintenance; Public Healt

Introdução

A gestão da saúde pública enfrenta o desafio constante de equilibrar recursos limitados com uma demanda assistencial crescente. Na SESAP/RN, a modernização dos processos de gestão não é apenas uma conveniência administrativa, mas um imperativo para a viabilidade do SUS estadual. Este artigo sintetiza as intervenções realizadas pelo projeto DIMP-SESAP/RN (período nov/2025 – abr/2026), que utiliza a Engenharia de Produção como vetor de transformação. O foco central deste trabalho reside em duas áreas críticas: Gestão de Manutenção de Equipamentos e Gestão de Aquisições. O problema central identificado foi a dependência de modelos reativos, a ausência de indicadores de desempenho (KPIs) confiáveis e a fragmentação dos fluxos de trabalho que impediam a tomada de decisão estratégica. A intervenção propôs a transição para um modelo proativo, utilizando ferramentas de BPM para o mapeamento e padronização (As-Is/To-Be) e RPA para a automação de fluxos burocráticos. O projeto alinha-se à Agenda 2030, diretamente impactando os ODS: (3) Saúde e Bem-Estar, ao garantir a disponibilidade de equipamentos; (8) Trabalho Decente, ao otimizar o labor dos servidores; (10) Redução das Desigualdades, ao padronizar o nível de serviço em todas as unidades de saúde; (11) Cidades Sustentáveis, pela resiliência institucional; e (17) Parcerias, fortalecendo a integração UFRN-SESAP. O objetivo é demonstrar como o binômio "gestão de processos + automação" moderniza a estrutura pública, garantindo governança e transparência.

Metodologia

A pesquisa classifica-se como aplicada, desenvolvida entre novembro de 2025 e abril de 2026. A metodologia foi dividida em eixos operacionais:

Gestão de Processos (BPM): Para a manutenção, utilizou-se modelagem BPMN para diagnóstico e desenho da nova minuta contratual, integrando Instrumentos de Medição de Resultados (IMR) baseados na Lei 14.133/2021.

Automação de Processos (RPA): Na frente de aquisições, desenvolveu-se automação em Python (Selenium/Pandas) para o tratamento de dados de 56 unidades, eliminando tarefas manuais de consolidação de notas.

Análise Lean: Utilizou-se o Diagrama de Ishikawa para análise de causas-raiz da baixa aderência ao SIPAC, permitindo identificar gargalos na burocracia do recebimento.

Gestão à Vista: Implementou-se monitoramento via Power BI, permitindo que a gestão da SESAP acompanhasse em tempo real o backlog de notas e o grau de utilização do sistema, elevando a transparência e a capacidade de intervenção rápida.

Resultados e Discussões

A gestão da manutenção superou o modelo reativo tradicional através de uma reestruturação contratual profunda. A nova minuta, validada pioneiramente no Hemonorte, prioriza a confiabilidade técnica através de KPIs como MTTR (Tempo Médio para Reparo) e MTBF (Tempo Médio entre Falhas). A transição para pagamento por desempenho (IMR) mitiga o risco de descontinuidade assistencial, pois vincula o recebimento da empresa contratada à disponibilidade real dos equipamentos. O projeto identificou que a falta de um sistema de CMMS padronizado era a maior falha estratégica, e a proposta atual estabelece as bases para uma gestão baseada em dados, não em correções emergenciais.
Em aquisições, o cenário de "Apagar Incêndios" foi transformado. A implementação do projeto "Certifica-Nota" reduziu drasticamente o tempo de processamento de documentos: o ciclo que consumia 480 minutos foi reduzido para 9 minutos — uma melhoria de 98% na eficiência. Além disso, o projeto saneou um passivo logístico de 687 notas fiscais acumuladas que estavam travando a cadeia de suprimentos. A sinalização Andon, integrada aos dashboards, permitiu que a Coordenadoria de Aquisições e Suprimentos (CAS) atuasse proativamente sobre o risco de desabastecimento. A análise de causa-raiz demonstrou que a resistência cultural e a burocracia do recebimento eram os principais ofensores, e a automação digital atuou como contramedida direta para sanar esses gargalos.

Conclusão

A combinação da Engenharia de Produção com a Transformação Digital provou ser o caminho mais eficaz para a modernização da SESAP/RN. O estudo evidencia que a eficiência pública não depende exclusivamente de novos investimentos financeiros, mas da inteligência na gestão dos processos existentes. A manutenção orientada por indicadores e a automação de compras garantem maior agilidade na ponta assistencial, assegurando que o insumo ou equipamento esteja disponível quando o paciente precisa. As metas dos ODS 8 e 11 foram alcançadas ao promover um ambiente de trabalho mais eficiente e infraestrutura resiliente. Futuros estudos devem focar na integração de Machine Learning para a manutenção preditiva e na expansão do modelo de governança de dados para as demais secretarias do Estado.

Referências

BRASIL. Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. Institui a Lei de Licitações e Contratos Administrativos. 2021.

DIMP. Relatório Parcial Projeto DIMP SESAP (Nov/2025 – Abr/2026). Natal: UFRN, 2026.

ONU. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015.

TAYLOR, F. W. The Principles of Scientific Management. New York: Harper & Brothers, 1911.

WIREMAN, T. Developing performance indicators for managing maintenance. New York: Industrial Press, 2005.

BASTOS, M. Ferramentas da Qualidade – Matriz Gut. 2014.

CÓDIGO: ET1365

AUTOR: LEVI DA SILVA LOPES

ORIENTADOR: RODRIGO PRADO DE MEDEIROS

TÍTULO: Estudos Experimentais de uma Microrrede Real em Laboratório Para Determinação da sua Inércia e da sua Constante de Amortecimento

Resumo

Este trabalho apresenta a montagem de uma bancada experimental e a implementação de rotinas em tempo real para aquisição e extração de grandezas elétricas sob variações de carga em uma microrrede laboratorial. Desenvolvido no PTX Lab (UFRN) com apoio da cota PIBIC/CNPq e vinculado às ODS 7, o setup integra um grupo motor CC-gerador síncrono de 5 kVA emulando uma hidrelétrica, um sistema fotovoltaico de 8 kWp com inversor VSI, bancos de carga chaveados por contatores e sensores de efeito Hall acoplados à plataforma dSPACE DS1103 operando a 10 kHz. A partir das medições no Ponto de Acoplamento Comum (PCC), os sinais trifásicos foram transformados para o referencial síncrono (dq) para cálculo da potência ativa instantânea, enquanto a frequência da rede foi rastreada via malha SRF-PLL. Nos ensaios com degrau de carga de 90 W para 180 W, os algoritmos registraram com precisão o salto de corrente, a elevação de potência e a resposta transitória amortecida da frequência. Os resultados consolidam a infraestrutura e validam o processamento de sinais, fornecendo dados reais para suporte a futuras pesquisas em controle e estabilidade.

Palavras-chave: Microrredes; Processamento de Sinais; dSPACE; SRF-PLL

TITLE: Experimental Studies of a Real Laboratory Microgrid: Acquisition and Extraction of Electrical Quantities under Load Variation

Abstract

This work presents the implementation of an experimental microgrid testbed and real-time signal processing routines for acquiring and extracting dynamic electrical quantities under load disturbances. Developed at the Power Electronics and Microgrids Laboratory (PTX Lab/UFRN) under the PIBIC/CNPq program (aligned with SDG 7), the physical setup comprises a 5 kVA synchronous generator-motor set emulating hydro generation, an 8 kWp photovoltaic system interfaced by a VSI inverter, switched load banks, and Hall-effect sensors linked to a dSPACE DS1103 system at 10 kHz. Three-

phase voltages and currents measured at the Point of Common Coupling (PCC) are converted to the synchronous reference frame dq to determine instantaneous active power, while dynamic grid frequency is tracked using a Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop (SRF-PLL). Under load step tests from 90 W to 180 W, the system captured current transitions, active power variations, and damped frequency oscillations. The results validate the experimental platform and data acquisition methodology, providing experimental datasets to support future control and stability studies.

Keywords: Microgrids; Signal Processing; dSPACE; SRF-PLL; Active Power; Frequenc

Introdução

A crescente inserção de fontes renováveis conectadas por conversores eletrônicos vem reduzindo a inércia rotativa natural dos sistemas elétricos, tornando as redes e microrredes mais suscetíveis a desvios de frequência diante de variações de carga. Para analisar a resposta dinâmica desses sistemas, é fundamental a medição e o processamento preciso de grandezas elétricas em tempo real.

Neste contexto, este trabalho teve como foco a montagem e a caracterização experimental da microrrede do laboratório PTX Lab (UFRN), composta por um conjunto motor CC–máquina síncrona (emulador hidrelétrico), sistema fotovoltaico de 8 kWp e bancos de carga chaveados.

Foram desenvolvidas rotinas para a aquisição de sinais de tensão e corrente no Ponto de Acoplamento Comum (PCC) e algoritmos para determinação da potência ativa e extração da frequência instantânea durante perturbações controladas de carga, tanto em operação isolada quanto conectada. Além dos ensaios em bancada, foram realizadas simulações preliminares no software PSIM para suporte à modelagem. Os dados obtidos fornecem a base necessária para os estudos de dinâmica e controle de redes elétricas desenvolvidos no laboratório.

Metodologia

O desenvolvimento do plano de trabalho integrou fundamentação teórica, simulação computacional e ensaios práticos na bancada experimental do PTX Lab (UFRN).

2.1 Fundamentação Teórica e Modelagem

Inicialmente, realizou-se o estudo sobre a operação de máquinas síncronas, circuitos elétricos e microrredes. A microrrede foi modelada por meio de um circuito equivalente contemplando gerador síncrono, linha de distribuição, cargas e o Ponto de Acoplamento Comum (PCC). Em seguida, simulações preliminares no software PSIM permitiram avaliar a resposta dinâmica do sistema e a relação transitória entre variações de potência e frequência.

2.2 Configuração da Bancada Experimental

A estrutura do laboratório foi configurada para operar em duas fases principais:

Fase 1 (Operação Isolada): Máquina síncrona de 5 kVA tracionada por motor de corrente contínua (emulador hidrelétrico) alimentando bancos de carga lineares e não lineares.

Fase 2 (Operação Integrada): Conexão simultânea da geração síncrona com um sistema fotovoltaico de 8 kWp.

2.3 Ensaios de Variação de Carga

Durante os ensaios, degraus controlados de carga foram inseridos por meio de contatores chaveados para induzir desequilíbrios controlados entre geração e consumo. As tensões de fase e correntes de linha foram adquiridas diretamente no PCC por meio de transdutores de efeito Hall acoplados à plataforma de prototipagem rápida dSPACE (amostragem de 10 kHz).

2.4 Algoritmo de Extração de Grandezas

Os dados brutos foram processados por meio de algoritmos implementados para o cálculo e extração das variáveis dinâmicas em tempo real:

Potência Ativa (P): Os sinais foram convertidos para o referencial síncrono dq

Frequência (f): A frequência instantânea e angular da rede foi rastreada utilizando uma malha de sincronização baseada em Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop (SRF-PLL).

As séries temporais de tensão, corrente, potência e frequência obtidas foram organizadas e validadas para posterior utilização nos algoritmos de controle e parametrização do laboratório.

Resultados e Discussões

3.1 Validação em Simulação (PSIM)

As simulações computacionais no software PSIM validaram o modelo elétrico da microrrede frente a perturbações de carga. Observou-se que a inserção de degraus de carga provoca um desbalanço imediato de potência ativa, resultando em uma queda transitória de frequência antes da estabilização em um novo regime permanente, confirmando o comportamento dinâmico esperado.

3.2 Desempenho Experimental e Extração de Sinais

Nos ensaios realizados na bancada do PTX Lab, o sistema foi avaliado diante da aplicação de degraus de carga chaveados para provocar desequilíbrios entre geração e consumo:

Tensões e Correntes: Os sensores no PCC adquiriram continuamente as formas de onda de tensão e corrente de fase, registrando a elevação e a dinâmica das correntes durante as alterações de carga sem distorções severas na tensão.

Potência Ativa: A rotina implementada no referencial síncrono dq calculou com precisão a potência ativa instantânea no PCC, acompanhando as variações de potência consumida pelo sistema.

Frequência (SRF-PLL): A malha de sincronização rastreou a frequência angular e em hertz em tempo real, capturando com exatidão os desvios transitórios e a acomodação da frequência da microrrede frente às perturbações impostas.

3.3 Discussão

A integração entre os sensores, o sistema dSPACE e os algoritmos desenvolvidos possibilitou a obtenção de séries temporais de alta fidelidade e com baixo nível de ruído. A extração correta de P e f no PCC comprovou a eficácia do arranjo experimental para reproduzir transitórios controlados, disponibilizando a base de dados necessária para que os algoritmos de estimação e controle do laboratório operem com dados reais da bancada.

Conclusão

As atividades desenvolvidas no plano de trabalho cumpriram com êxito as metas propostas para a caracterização experimental da microrrede do PTX Lab (UFRN).

A integração entre modelagem computacional no PSIM e ensaios físicos em bancada permitiu avaliar a resposta dinâmica do sistema diante de variações controladas de carga. A infraestrutura experimental, combinando o conjunto motor CC–gerador síncrono, sistema fotovoltaico e banco de cargas, operou de forma estável nas fases isolada e integrada.

O algoritmo implementado na plataforma dSPACE realizou com precisão a extração de grandezas no Ponto de Acoplamento Comum (PCC), rastreando a potência ativa no referencial síncrono dq e os transitórios de frequência via SRF-PLL.

O trabalho consolidou a base de aquisição e processamento de dados experimentais do laboratório, fornecendo as entradas necessárias para as etapas seguintes de estimação paramétrica e desenvolvimento de estratégias de controle em redes elétricas.

Referências

AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. 2. ed. Hoboken: IEEE Press / John Wiley & Sons, 2017.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

KUNDUR, P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994.

GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C.; MATAS, J.; DE VICUÑA, L. G.; CASTILLA, M. Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids: A General Approach Toward Standardization. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 58, n. 1, p. 158–172, 2011.

YAZDANI, A.; IRAVANI, R. Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications. Hoboken: IEEE Press / John Wiley & Sons, 2010.

dSPACE GmbH. DS1103 PPC Controller Board: Hardware Installation and Configuration. Paderborn: dSPACE GmbH, 2020.

CÓDIGO: ET1372

AUTOR: MARCOS VINICIUS GOMES DA CRUZ

ORIENTADOR: SANDRA RUFINO SANTOS

TÍTULO: Do direito ao prato: Tecnologia Social, agricultura familiar e mercados institucionais no Seridó potiguar

Resumo

Este artigo objetiva discutir os desafios de participação social, segurança alimentar e mercados institucionais no Território do Seridó potiguar, a partir de vulnerabilidades e capacidades relacionadas à agricultura familiar, às políticas públicas e às instâncias de controle social para então apresentar o Projeto SEMEAR, desenvolvido no âmbito da Chamada CNPq/FNDCT/SGPR/MDS nº 17/2025 – Extensão e Pesquisa em Participação Social nos Territórios. Metodologicamente, trata-se de pesquisa documental e descritiva, de abordagem mista, baseada na análise do SEMEAR, de dados sobre compras da agricultura familiar no PNAE e PAA, do Censo Agropecuário e de informações sobre instâncias participativas. Os resultados indicam forte presença da agricultura familiar e potencial para circuitos alimentares territorializados, mas também fragilidades na governança, baixa articulação entre atores, descontinuidade das instâncias participativas e oscilações nas compras públicas. Nesse cenário, o SEMEAR propõe um Observatório de Tecnologia Social para Participação Popular e Segurança Alimentar, com ações de formação, monitoramento participativo, sistematização de experiências e produção de evidências para subsidiar políticas públicas. Conclui-se que o fortalecimento da segurança alimentar no Seridó depende da articulação entre participação social, agricultura familiar e capacidade territorial de incidir nos mercados institucionais.

Palavras-chave: Segurança Alimentar; Agricultura Familiar; Tecnologia Social.

TITLE: From the Right to the Plate: Social Technology, Family Farming and Institutional Markets in the Seridó Region of Rio Grande do Norte

Abstract

This article aims to discuss the challenges of social participation, food security, and institutional markets in the Seridó Territory of Rio Grande do Norte, based on vulnerabilities and capacities related to family farming, public policies, and social control institutions, and subsequently present the SEMEAR Project, developed within the scope of the CNPq/FNDCT/SGPR/MDS Call No. 17/2025 – Extension and Research on Social Participation in Territories. Methodologically, this is a documentary and descriptive study with a mixed-methods approach, based on the analysis of SEMEAR, data on family farming purchases through the National School Feeding Program (PNAE) and the Food Acquisition Program (PAA), the Agricultural Census, and information on participatory institutions. The results indicate a strong presence of family farming and potential for territorialized food circuits, but also governance weaknesses, limited coordination among actors, discontinuity of participatory institutions, and fluctuations in public procurement. In this context, SEMEAR proposes a Social Technology Observatory for Popular Participation and Food Security, with actions focused on training, participatory monitoring, systematization of experiences, and the production of evidence to support public policies. It is concluded that strengthening food security in the Seridó region depends on the articulation of social participation, family farming, and the territory's capacity to influence institutional markets.

Keywords: Food Security; Family Farming; Social Technology

Introdução

No Brasil, a alimentação foi incorporada aos direitos sociais previstos no art. 6º da Constituição Federal, reforçando sua condição de direito fundamental e responsabilidade pública (Brasil, 1988). Essa compreensão foi aprofundada pela Lei nº 11.346/2006, que instituiu o Sistema Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional (SISAN) para assegurar o Direito Humano à Alimentação Adequada (DHAA) (Brasil, 2006). Nesse marco, a Segurança Alimentar e Nutricional (SAN) passou a envolver o acesso regular e permanente a alimentos de qualidade, em quantidade suficiente, respeitando a diversidade cultural e a sustentabilidade ambiental, econômica e social das práticas alimentares.

No semiárido brasileiro, a SAN assume contornos próprios, pois o acesso regular a alimentos depende de condições sociais, ambientais e institucionais atravessadas pela seca, irregularidade hídrica e desigualdade histórica no acesso a recursos. Ao analisar políticas voltadas ao semiárido, Alpino (2020) observa que renda e água aparecem com maior presença nas respostas públicas, enquanto saneamento, educação, informação, conhecimento técnico e oportunidades de trabalho produtivo seguem pouco incorporados aos programas, revelando uma abordagem parcial da questão alimentar.

A agricultura familiar é base produtiva desses territórios, sustentando autoconsumo, comercialização em circuitos curtos e permanência no campo, mesmo sob um clima que a narrativa dominante insiste em tratar como condenado à infertilidade. Essa centralidade produtiva, somada à inserção historicamente restrita nos canais de mercado, explica o surgimento dos mercados institucionais, como PAA e PNAE, que

conectam a compra pública à produção local, com potencial para ampliar renda, inclusão produtiva e permanência no campo, desde que existam informação, organização coletiva e logística (Rossetti; Silva; Winnie, 2016; Sousa, 2021; Elias et al. 2023).

No território, as dinâmicas de participação e controle social encontram limites diante das múltiplas realidades do país; o próprio SISAN, basilar para mercados institucionais como o PAA, enfrenta dificuldades de capilaridade, sobretudo pela fragilidade de estruturas locais capazes de sustentar a política (Vasconcellos; Moura, 2018). No caso do PNAE, os Conselhos de Alimentação Escolar (CAE) também enfrentam essa tensão, pois sua atuação depende de formação, autonomia, acesso a informações e condições materiais de funcionamento (Gabriel et al., 2013; Silva; Muniz, 2022). É nessa lacuna que a Tecnologia Social permite enxergar uma camada menos visível de participação: comunidades que reconhecem problemas, testam soluções e disputam sua permanência (Souza e Pozzebon, 2020).

Dessa forma, o trabalho toma o Seridó do Rio Grande do Norte como locus para analisar as relações entre Tecnologia Social, mercados institucionais e participação social. Parte-se da hipótese de que a inserção da agricultura familiar em mercados como PAA e PNAE não depende apenas da capacidade produtiva, mas também da articulação entre organizações sociais, instâncias participativas, assistência técnica, circulação de informações e capacidade da gestão pública de transformar políticas nacionais em arranjos territoriais efetivos.

Nesse contexto, o Projeto SEMEAR no Seridó, desenvolvido no âmbito da Chamada CNPq/FNDCT/SGPR/MDS nº 17/2025, propõe um Observatório de Tecnologia Social para Participação Popular e Segurança Alimentar, voltado à leitura territorial, ao acompanhamento de experiências locais e à qualificação da incidência social sobre as políticas de SAN. O objetivo é analisar as condições de participação social, segurança alimentar e inserção da agricultura familiar nos mercados institucionais no Seridó potiguar, tendo o SEMEAR e seu Observatório como estratégia de fortalecimento da participação popular e da segurança alimentar na região.

Metodologia

A pesquisa caracteriza-se como documental, descritiva e analítica, com abordagem mista. A opção pela pesquisa documental decorre do uso de bases públicas, documentos institucionais e registros administrativos como materiais centrais de investigação, compreendidos como fontes capazes de revelar processos sociais, arranjos institucionais e formas de implementação de políticas públicas (Gil, 2008; Sá-Silva; Almeida; Guindani, 2009). A abordagem mista justifica-se pela articulação entre dados quantitativos, utilizados para caracterizar o território e analisar a execução de mercados institucionais, e dados qualitativos, mobilizados para interpretar documentos, instâncias participativas e o desenho do Projeto SEMEAR (Creswell; Creswell, 2021).

As fontes de dados incluem informações territoriais e agropecuárias do IBGE, especialmente o Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2017); dados públicos do FNDE

sobre compras da agricultura familiar no PNAE (FNDE, 2024); informações disponíveis sobre execução do PAA; registros sobre CAEs, CONSEAs e outras instâncias vinculados à SAN; além do documento do Projeto SEMEAR, analisado a partir de seus objetivos, público, metodologia e repertório teórico.

A análise quantitativa baseou-se em uma matriz municipal-ano construída com dados do FNDE, relacionando os valores totais transferidos, os montantes destinados à agricultura familiar e seus respectivos percentuais, diferenciando rigorosamente os registros de execução zerada das ausências de informação. Devido ao volume da série histórica, a base empírica não foi integralmente exposta no texto, seu processamento e a modelagem gráfica ocorreram via linguagem Python, no ambiente Google Colab, viabilizando a leitura agregada das dinâmicas territoriais no Seridó. Conjuntamente, a dimensão qualitativa foi desenvolvida por análise documental, orientada pela leitura dos registros institucionais, referenciais teóricos e do documento do Projeto SEMEAR.

Resultados e Discussões

Seri, meu Seridó

Na canção “Seri, Seridó”, Elino Julião, cantor de forró (1936-2006) conhecido pela forte ligação à cultura da região do Seridó, faz do pertencimento ao lugar uma forma de permanência, associando o afeto pela terra à imagem do algodão mocó, elemento que remete à memória produtiva e à formação econômica do território seridoense. Ao tomar esse verso como título da subseção, o artigo situa o Seridó a partir de uma expressão cultural própria, em que a vida sertaneja aparece atravessada por trabalho rural, convivência com o semiárido e disputas por condições de permanência, antes de ser reduzida a uma paisagem de escassez.

Para dimensionar o Seridó também como base produtiva, foram consultados os dados do Censo Agropecuário de 2017. Como o recorte do Território da Cidadania do Seridó não aparece pré-agregado na plataforma, os 25 municípios indicados anteriormente foram selecionados individualmente e seus resultados somados, permitindo observar o conjunto regional a partir da tipologia dos estabelecimentos agropecuários. A primeira evidência diz respeito à predominância numérica da agricultura familiar na estrutura produtiva do território: dos 10.974 estabelecimentos agropecuários identificados no Seridó, 8.861 são classificados como agricultura familiar, o que corresponde a 80,7% do total, enquanto 2.113 pertencem à agricultura não familiar, equivalentes a 19,3%, conforme apresentado na Gráfico 1. O retrato regional, apesar de expressivo, abriga variações municipais relevantes; em municípios a participação da agricultura familiar alcança patamares elevados, aumentando porcentagem média total, enquanto outros apresentam maior presença relativa de estabelecimentos não familiares.

A segunda dimensão, observada na Gráfico 2, retrata o vínculo associativo dos produtores, variável importante para compreender a capacidade de organização social da base agropecuária seridoense. A partir da Tabela 6846 do censo, verifica-se que 6.595 dos 10.974 estabelecimentos agropecuários do território possuem produtores associados a alguma cooperativa, entidade de classe, sindicato, associação ou

movimento, o que corresponde a 60,1% do total; entre os estabelecimentos da agricultura familiar, esse percentual chega a 63,0% (5.582 de 8.861), enquanto na agricultura não familiar alcança 47,9% (1.013 de 2.113).

A composição dos vínculos também revela o predomínio de formas organizativas mais ligadas à representação social e sindical do que à cooperação econômica formal, no conjunto do Seridó, aparecem 5.357 registros de associação a entidade de classe ou sindicato, diante de 1.445 vinculados a associações de moradores, 1.329 a associações ou movimentos de produtores e apenas 226 a cooperativas. A distribuição indica que a agricultura familiar dispõe de uma base associativa expressiva, porém, menos ancorada em cooperativas, forma organizativa frequentemente exigida ou mobilizada para ampliar escala, regularidade e capacidade de acesso aos mercados.

No entanto, a predominância numérica da agricultura familiar e a presença expressiva de vínculos associativos não se traduzem, na mesma proporção, em acesso à orientação técnica. A análise desse indicador foi incorporada porque a inserção em mercados institucionais, como PAA e PNAE, depende de condições como planejamento produtivo, regularidade de oferta, adequação documental, organização sanitária e capacidade de diálogo com a gestão pública. Nesse sentido, a Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) ocupa papel estratégico ao conectar produção, gestão e acesso às políticas públicas. Os dados do Censo Agropecuário de 2017 revelam, entretanto, uma cobertura reduzida: apenas 2.022 dos 10.974 estabelecimentos agropecuários do Seridó declararam receber algum tipo de orientação técnica, o equivalente a 18,4% do total; entre os estabelecimentos da agricultura familiar, a cobertura cai para 15,9% (1.410 de 8.861), enquanto na agricultura não familiar alcança 29,0% (612 de 2.113), como apresentado no Gráfico 4. Além da baixa cobertura, observa-se que a orientação recebida pelos agricultores familiares provém majoritariamente de órgãos governamentais, apontando para uma maior dependência das estruturas públicas de ATER. Já os estabelecimentos não familiares apresentam maior capacidade de acessar assistência por meios próprios, seja pela contratação de profissionais especializados, seja pelo suporte oferecido por empresas privadas vinculadas à atividade produtiva. A diferença sugere que as limitações de acesso à assistência técnica representam um fator que pode restringir a capacidade da agricultura familiar de atender exigências institucionais.

A caracterização apresentada nesta subseção aponta para um Seridó diverso, com forte presença da agricultura familiar e formas relevantes de organização social, ainda que reafirme um cenário de baixo acompanhamento técnico. Reconhecê-lo como território que “fala alto” e encanta, como sugere a canção de Elino Julião, exige olhar também para suas vulnerabilidades: Andrade, Souza e Silva (2013) já identificavam, no caso da agricultura familiar seridoense, restrições de crédito e recursos, limitação hídrica, reduzido tamanho das propriedades, dependência de atravessadores e migração juvenil, dimensões que ajudam a compreender os limites concretos da produção e da comercialização no semiárido; conhecê-las é parte do esforço de construir estratégias adaptativas e de avaliar políticas públicas, como os mercados institucionais analisados a seguir, a partir das condições reais em que agricultores familiares produzem, se organizam e buscam permanecer no território.

O alimento entre a política e o território

A alimentação escolar é uma das formas tangíveis pelas quais o Estado chega ao cotidiano, ela aparece no prato servido diariamente, atravessa a rotina das escolas e, desde a Lei nº 11.947/2009, também pode reorganizar relações entre produção local, abastecimento público e agricultura familiar. Ao estabelecer que, no mínimo, 30% dos recursos repassados pelo FNDE fossem destinados à compra direta de alimentos da agricultura familiar, o PNAE passou a incidir sobre duas pontas da cadeia alimentar: de um lado, os estudantes, pelo acesso regular à alimentação adequada no ambiente escolar; de outro, os agricultores familiares, pela abertura de um mercado público capaz de gerar renda, escoar produção e fortalecer circuitos locais de abastecimento.

A elevação do percentual mínimo para 45% a partir de 2026 torna necessário observar a trajetória anterior da política, pois o novo patamar exige dos municípios maior capacidade de planejamento, articulação com produtores, elaboração de chamadas públicas e acompanhamento da execução. No Seridó, foram reunidos todos os dados públicos disponíveis do PNAE (2011 a 2022), a fim de verificar como os municípios se comportaram diante da exigência histórica de 30%, quais oscilações marcaram a série e em que medida a presença expressiva da agricultura familiar no território se converteu, ou não, em compra pública efetiva.

O Gráfico 5 evidencia que, no conjunto do Seridó, a aquisição da agricultura familiar permaneceu abaixo do patamar histórico de 30% em praticamente toda a série analisada. Entre 2011 e 2018, o percentual agregado oscilou em níveis baixos, partindo de 8,5% em 2011, aproximando-se de 13% em 2013 e 2014, e recuando para 7,5% em 2017; em 2019, observa-se a primeira elevação mais expressiva, com 20,8%, seguida de forte queda em 2020, quando o percentual agregado desce para 5,3%. Esse recuo coincide com o período pandêmico, momento em que o PNAE assumiu relevância particular para a SAN por meio da distribuição de gêneros alimentícios e kits às famílias dos estudantes, autorizada excepcionalmente durante a suspensão das aulas presenciais; contudo, no caso do Seridó, os dados sugerem que a outra ponta da cadeia alimentar — os produtores rurais familiares — não recebeu resguardo equivalente na execução das compras públicas, justamente em um período de elevada instabilidade econômica e social. Apenas em 2022 o território ultrapassa o mínimo legal histórico, alcançando 31,2%, avanço que precisa ser lido com cautela diante da irregularidade acumulada e do novo patamar de 45% a partir de 2026.

A leitura agregada, entretanto, tende a suavizar desigualdades internas importantes, razão pela qual o Gráfico 6 apresenta a distribuição municipal dos percentuais ao longo da série. Durante a construção da base, foram identificados anos em que alguns municípios constavam como “sem dados”, especialmente em 2018, situação tratada como ausência de informação e não como execução nula; essa diferenciação é metodologicamente relevante porque o percentual zero indica ausência de compra registrada da agricultura familiar, enquanto o campo sem dados impede inferência direta sobre execução. O boxplot (onde cada bolha é um município) revela que, mesmo em anos com casos municipais acima de 30% ou 45%, a maior parte da distribuição permanece concentrada em faixas inferiores, com medianas abaixo do mínimo histórico em praticamente toda a série; em outras palavras, os melhores desempenhos parecem associados a municípios e anos específicos, enquanto a efetivação ampla da compra pública da agricultura familiar não se consolida como padrão regional.

Conclui-se, por conseguinte, que a efetivação do PNAE no Seridó permanece instável, a série histórica indica dificuldade recorrente de cumprimento do patamar de 30%, enquanto o novo mínimo de 45%, vigente a partir de 2026, amplia a pressão sobre planejamento, chamada pública, articulação com agricultores e acompanhamento da execução. Quanto aos CAEs, os registros públicos consultados confirmam sua existência formal nos municípios, sobretudo por meio de nomeações, formações, chamadas públicas e atos ligados à prestação de contas; essa materialidade institucional, porém, parece ainda mais visível no controle fiscal e documental do que na incidência continuada sobre os gargalos processuais. A questão que se abre, portanto, é menos sobre a presença legal dos conselhos e mais sobre sua potência política: como mobilizar participação popular para que o CAE acompanhe cardápios, editais, fornecedores, logística e percentuais de aquisição? Como transformar o parecer anual em processo vivo de controle social?

A instabilidade observada no PNAE encontra eco na baixa institucionalização municipal da Segurança Alimentar e Nutricional. O SISAN foi concebido para articular União, estados, municípios e sociedade civil na formulação, implementação, monitoramento e avaliação de políticas de SAN; para aderir, o município precisa instituir e regulamentar o próprio sistema, a Conferência Municipal, o CONSEA e a Câmara Intersetorial de Segurança Alimentar e Nutricional (CAISAN), além de assumir o compromisso de elaborar o Plano Municipal de SAN e comprovar, posteriormente, o funcionamento dessas instâncias. No Rio Grande do Norte, constam como aderidos ao SISAN apenas Açu, Canguaretama, Carnaubais, Jaçanã, Macaíba, Natal, Santo Antônio e Serrinha, sem qualquer município do Território da Cidadania do Seridó na listagem oficial consultada (Brasil, 2026).

Essa ausência produz efeitos práticos sobre o acesso a determinadas modalidades federais, como o PAA, cuja execução por termo de adesão, especialmente na modalidade Compra com Doação Simultânea, exige que o ente federativo esteja aderido ao SISAN, conforme o Decreto nº 11.802/2023. Em termos territoriais, isso significa que os municípios do Seridó, mesmo possuindo base expressiva de agricultura familiar, ficam fora de uma via importante de operacionalização direta do PAA enquanto não consolidarem sua adesão ao sistema; por outro caminho, a região aparece historicamente vinculada a mercados institucionais do leite, já que o PAA-Leite é uma modalidade executada por convênios entre o governo federal e os estados do Nordeste e de Minas Gerais, voltada à compra pública de leite de agricultores familiares para posterior doação a unidades recebedoras ou ao público destinatário.

A experiência do leite, não obstante, revela que a presença de uma modalidade ativa não resolve, por si, os gargalos de participação e inserção produtiva. Silva (2018), ao estudar os mercados institucionais no Seridó potiguar, incluindo o Programa Leite Potiguar e o PAA-Leite, aponta limitações relacionadas aos arranjos institucionais, à dispersão geográfica dos produtores, a problemas produtivos e a critérios que podem dificultar a entrada dos agricultores familiares nos programas. O achado dialoga com a leitura construída ao longo do trabalho, as normativas federais desenham um modelo robusto de SAN, com conselhos, câmaras intersetoriais, conferências, planos, controle social e compras públicas orientadas à agricultura familiar, mas a prática territorial mostra uma engrenagem incompleta, na qual o CAE aparece com maior visibilidade em atos formais e fiscais, o CONSEA e a CAISAN municipais não se apresentam como estruturas consolidadas no Seridó via SISAN, e a passagem da produção familiar para o mercado

público depende de mediações que ainda parecem frágeis, descontínuas ou pouco documentadas.

A fragilidade dessas instâncias não impede reconhecer caminhos possíveis de fortalecimento da participação social no território, tornando pertinente iniciativas como o Projeto SEMEAR, apresentado na seção seguinte. A proposta reforça a importância de ampliar os processos de sensibilização da sociedade acerca de seu papel na formulação, acompanhamento e fiscalização das políticas públicas, especialmente aquelas relacionadas à Segurança Alimentar e Nutricional. De forma complementar, gestores públicos também precisam estar informados e comprometidos com a relevância das instâncias participativas, da transparência administrativa e da articulação com agricultores familiares e organizações locais.

O território como método: Observatório SEMEAR, participação popular e Tecnologia Social

As fragilidades expostas na estrutura produtiva e na execução das políticas de Segurança Alimentar e Nutricional no Seridó, traduzidas na baixa cobertura de assistência técnica, na dificuldade de alcance das cotas do PNAE e na desarticulação frente ao SISAN, configuram um cenário de esvaziamento das arenas locais de decisão. É sob esse cenário que o projeto SEMEAR (Segurança alimentar, Educação popular, Monitoramento participativo, Extensão universitária, Agroecologia e paRticipação social) se estrutura, propondo mobilizar o recorte regional para reconstituir os mecanismos de formulação e fiscalização pública.

Primeiro, busca-se mapear as experiências de convivência com a seca mediadas por tecnologias sociais, a exemplo de cisternas de placas, barragens subterrâneas e biodigestores, identificando de forma precisa as potencialidades e fragilidades locais. Esse levantamento empírico utiliza dinâmicas de ATER, adotando o Diagnóstico Rural Participativo (DRP) como ferramenta metodológica. Em paralelo, a intervenção busca qualificar o território por meio da formação de multiplicadores comunitários, cujo foco principal recai sobre a população jovem, assumindo o engajamento produtivo e político como tática direta de enfrentamento ao êxodo rural. A capacitação em participação social oferece os subsídios necessários para que esses atores incidam sobre a reativação de instâncias que se encontram paralisadas, como comitês gestores do PAA e os CONSEAs, visando também elevar a qualidade técnica do acompanhamento realizado pelas representações civis no interior dos CAEs.

O acervo de práticas mapeadas em campo e o monitoramento das instâncias representativas convergem para uma plataforma digital georreferenciada, formando, assim, o observatório. O sistema reúne as tecnologias em uso na região e organiza o fluxo de informações sobre as dinâmicas de controle social, projetando dados estruturados para compor a agenda pública, como a construção de Planos Plurianuais (PPAs).

Tomando a título de ilustração o caso hipotético de uma propriedade no município de Jucurutu que possui um biodigestor, pode-se imaginar que a TS atende adequadamente ao tratamento de resíduos e fornece biofertilizante para as plantações, mas como entrave a família pode esbarrar na dificuldade de gerar excedentes e comercializar via PAA e PNAE. O obstáculo reside na indisponibilidade contínua de sementes e na justa recusa

dos agricultores em adotar variedades transgênicas. Se a plataforma georreferenciada apontar que essa restrição se estende de forma ampla por outras propriedades da região, a construção de uma Casa de Sementes Comunitária pode ser uma solução viável de impacto territorial. A partir do sistema, o gestor público visualiza a demanda agregada e ganha suporte empírico para direcionar os recursos, convertendo uma fragilidade dispersa em planejamento estratégico.

A escolha da Tecnologia Social como campo orientador decorre da compreensão de que os desafios identificados no Seridó não são apenas produtivos, institucionais ou informacionais, mas sociotécnicos. A formulação proposta pela ABEPETS compreende a Tecnologia Social como um processo sociotécnico orientado à democratização das decisões sobre a tecnologia, à construção coletiva do conhecimento e à ampliação da autonomia dos grupos envolvidos, reconhecendo que trajetórias duradouras dependem da articulação entre pessoas, organizações e relações sociais (Bagattolli et al., 2026), perspectiva que dialoga diretamente com o projeto ao deslocar a atenção dos artefatos para os processos de aprendizagem, organização e incidência coletiva produzidos no território. Merece atenção, contudo, a advertência de Novaes e Dias (2009) acerca da reaplicação: experiências socialmente construídas não devem ser transferidas como modelos acabados, pois cada território reúne condicionantes históricos, ambientais, produtivos e institucionais particulares. A contribuição da Tecnologia Social passa, então, pela capacidade de adaptar, recriar e produzir respostas situadas, perspectiva que orienta o Observatório SEMEAR ao reconhecer que o fortalecimento da participação social e da Segurança Alimentar e Nutricional no Seridó passa pela construção coletiva de soluções coerentes com a realidade local.

Conclusão

A análise desenvolvida ao longo deste estudo permitiu compreender que a existência formal de programas e marcos legais nem sempre corresponde à solução utópica e perfeitamente efetiva que, por vezes, lhes é atribuída. Embora a pesquisa não tenha sido desenhada para estabelecer relações causais, os elementos observados indicam que a presença de arenas participativas, mecanismos de acompanhamento e espaços de articulação entre sociedade civil e poder público tende a influenciar as condições de implementação de programas como o PNAE e o PAA. Em sentido oposto, fragilidades institucionais e a ausência de estruturas permanentes de assistência técnica, participação e controle social aparecem associadas a dificuldades de coordenação, monitoramento e execução dessas políticas.

A construção teórica realizada também permitiu aproximar os debates sobre Segurança Alimentar e Nutricional, mercados institucionais, participação social e Tecnologia Social. A Tecnologia Social foi compreendida como uma possibilidade concreta de fortalecimento das capacidades coletivas dos territórios, sobretudo por valorizar processos de coprodução do conhecimento, autonomia comunitária e democratização das decisões. O estudo contribui, assim, para ampliar a compreensão sobre os desafios de implementação das políticas de SAN em contextos semiáridos e para evidenciar a importância das dimensões territoriais na análise dessas políticas.

Espera-se que a implementação das ações do projeto SEMEAR e do Observatório de Tecnologia Social produza evidências empíricas capazes de aprofundar e validar as relações aqui construídas em nível teórico, oferecendo dados concretos sobre os efeitos da participação social e das tecnologias sociais na promoção da Segurança Alimentar e Nutricional. Recomenda-se que, após as etapas iniciais de construção coletiva, implantação do observatório e consolidação das atividades previstas, sejam realizados estudos voltados à avaliação de seus impactos qualitativos e quantitativos.

Referências

ALPINO, Tais de Moura Ariza. Segurança Alimentar e Nutricional (SAN), seca e reprodução social: a realidade do semiárido brasileiro. 2020. 175 f. Tese (Doutorado em Saúde Pública) – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2020.

ANDRADE, Anna Jéssica Pinto de; SOUZA, Cimone Rozendo de; SILVA, Neusiene Medeiros da. A vulnerabilidade e a resiliência da agricultura familiar em regiões semiáridas: o caso do Seridó Potiguar. Revista Campo-Território, Uberlândia, v. 8, n. 15 Fev., 2013. DOI: 10.14393/RCT81519590. Disponível em:https://seer.ufu.br/index.php/campoterritorio/article/view/19590. Acesso em: 25 maio. 2026.

BAGATTOLLI, Carolina et al. Tecnologia social: princípios, elementos e definição. Zenodo, 2026. Disponível em:https://doi.org/10.5281/zenodo.18790708. Acesso em: 25 fev. 2026.

BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidente da República, 1988.

BRASIL. Decreto nº 11.802, de 28 de novembro de 2023. Regulamenta o Programa de Aquisição de Alimentos, instituído pela Lei nº 14.628, de 20 de julho de 2023. Brasília, DF: Presidência da República, 2023. Disponível em:https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/d11802.htm. Acesso em: 25 maio 2026.

BRASIL. Lei nº 11.346, de 15 de setembro de 2006. Cria o Sistema Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional - SISAN com vistas a assegurar o direito humano à alimentação adequada e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2006.

BRASIL. Lei nº 11.947, de 16 de junho de 2009. Dispõe sobre o atendimento da alimentação escolar e do Programa Dinheiro Direto na Escola aos alunos da educação básica. Brasília, DF: Presidência da República, 2009.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento e Assistência Social, Família e Combate à Fome. Municípios aderidos ao SISAN. Brasília, DF: MDS, 2026. Disponível

em:https://www.gov.br/mds/pt-br/caisan/sisan/listaatualizada_2153.pdf. Acesso em: 25 maio 2026.

CRESWELL, John W.; CRESWELL, J. David. Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021.

ELIAS, Lilian de Pellegrini; CAVALCANTE FILHO, Pedro Gilberto; CUNHA, Marcelo Pereira da; BELIK, Walter. Impactos do Programa Nacional de Alimentação Escolar sobre o emprego e a permanência no campo de agricultores familiares em Santa Catarina. Mercado de Trabalho: conjuntura e análise, Brasília, n. 75, abr. 2023. DOI: 10.38116/bmt75/pf2.

FNDE. Dados da agricultura familiar. Brasília, DF: FNDE, 2024. Disponível em:https://www.gov.br/fnde/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/pnae/consultas/pnae-dados-da-agricultura-familiar. Acesso em: 1 jun. 2026.

GABRIEL, Cristine Garcia et al. Conselhos Municipais de Alimentação Escolar em Santa Catarina: caracterização e perfil de atuação. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, p. 971-978, 2013. DOI:https://doi.org/10.1590/S1413-81232013000400009. Acesso em: 16 maio 2026.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

IBGE. Censo Agropecuário 2017: Resultados Definitivos. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em:https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017/resultados-definitivos. Acesso em: 24 maio 2026.

NOVAES, Henrique T.; DIAS, Rafael. Contribuições ao marco analítico-conceitual da tecnologia social. In: DAGNINO, Renato (org.). Tecnologia social: ferramenta para construir outra sociedade. Campinas: Unicamp, 2009. p. 17-53.

ROSSETTI, Francini Xavier; SILVA, Marina Vieira da; WINNIE, Lo Wai Yee. O Programa Nacional de Alimentação Escolar (PNAE) e o desafio da aquisição de alimentos regionais e saudáveis. Segurança Alimentar e Nutricional, Campinas, v. 23, n. 2, p. 912-923, 2016. DOI: 10.20396/san.v23i2.8647528. Disponível em:https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/san/article/view/8647528. Acesso em: 16 maio 2026.

SÁ-SILVA, Jackson Ronie; ALMEIDA, Cristóvão Domingos de; GUINDANI, Joel Felipe. Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas. Revista Brasileira de História & Ciências Sociais, [S. l.], v. 1, n. 1, 2009. DOI: 10.63595/rbhcs.v1i1.10351. Disponível em:https://periodicos.furg.br/rbhcs/article/view/10351. Acesso em: 7 jun. 2026.

SILVA, Christian Luiz da; MUNIZ, Dalton Metz. Controle social no Programa Nacional de Alimentação Escolar: limites e potencialidades da atuação dos conselhos no Paraná. Interações, Campo Grande, v. 23, n. 2, p. 473-488, 2022. DOI:https://doi.org/10.20435/inter.v23i2.3229. Acesso em: 16 maio 2026.

SILVA, Vinícius Klause da. Mercados institucionais no território do Seridó potiguar: potencialidades e limitações para inserção da agricultura familiar. 2018. 151 f. Dissertação (Mestrado em Estudos Urbanos e Regionais) – Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em:https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/26003. Acesso em: 25 maio 2026.

SOUSA, Diego Neves de. Os mercados institucionais e suas possibilidades para combate à pobreza rural e inclusão produtiva. Colóquio: Revista do Desenvolvimento Regional, Taquara, v. 18, n. 2, abr./jun. 2021. DOI: 10.26767/2028.

SOUZA, Ana Cláudia Albuquerque Alves de; POZZEBON, Marlei. Práticas e mecanismos de uma tecnologia social: proposição de um modelo a partir de uma experiência no semiárido. Organizações & Sociedade, v. 27, n. 93, p. 231–254, abr. 2020. Disponível em:https://doi.org/10.1590/1984-9270934. Acesso em: 5 jun. 2026.

VASCONCELLOS, Ana Beatriz Pinto de Almeida; MOURA, Leides Barroso Azevedo de. Segurança alimentar e nutricional: uma análise da situação da descentralização de sua política pública nacional. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 34, n. 2, e00206816, 2018. DOI:http://dx.doi.org/10.1590/0102-311x00206816. Disponível em:http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X2018000205016&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 23 jan. 2026. Epub Mar 01, 2018.

Anexos



Gráfico 1 – Estabelecimentos agropecuários por tipologia no território do Seridó. Fonte: elaboração própria com base no Censo Agropecuário 2017, Tabelas SIDRA 6780 e 6846 (IBGE, 2017).



Gráfico 2 - Vínculo associativo dos produtores nos estabelecimentos agropecuários do Seridó Fonte: elaboração própria com base no Censo Agropecuário 2017, Tabela SIDRA 6846 (IBGE, 2017).



Gráfico 3 - Cobertura da orientação técnica nos estabelecimentos agropecuários do Seridó Fonte: elaboração própria com base no Censo Agropecuário 2017, Tabela SIDRA 6780 (IBGE, 2017). Nota: as origens da orientação técnica podem se sobrepor



Gráfico 4 – Execução agregada das compras da agricultura familiar no PNAE no Território da Cidadania do Seridó, 2011-2022 Fonte: elaboração própria com base em dados do FNDE/PNAE (2011-2022).



Gráfico 5 – Distribuição municipal dos percentuais de aquisição da agricultura familiar no PNAE no Território da Cidadania do Seridó, 2011-2022 Fonte: elaboração própria com base em dados do FNDE/PNAE (2011-2022).

CÓDIGO: ET1377

AUTOR: LANNA PAOLA VITORIANO DE CARVALHO

ORIENTADOR: JOSE HERIBERTO OLIVEIRA DO NASCIMENTO

TÍTULO: Obtenção de Nanocápsulas de fibra da seda/inibidor da 5-alfarredutase para tratamento de alopecia

Resumo

Este trabalho descreve o desenvolvimento e a caracterização físico-química de nanopartículas de fibroína da seda (Bombyx mori) obtidas de resíduos têxteis para a encapsulação e liberação controlada de finasterida, visando o tratamento tópico da alopecia androgenética (AAG). A fibroína foi isolada por degomagem térmica dos casulos e purificada por diálise. As nanopartículas foram preparadas pelo método de nanoprecipitação por desolvação com gotejamento em etanol sob agitação constante a temperatura ambiente, avaliando-se três amostras com concentrações distintas do fármaco (Fina 2,5, Fina 5 e Fina 10). Ensaios de espectroscopia no UV-Vis validaram a linearidade da curva de calibração da finasterida na presença do tensoativo Pluronic. A caracterização física por Espalhamento de Luz Dinâmico (DLS) revelou diâmetros hidrodinâmicos médios de 151,2 ± 0,5 nm (Fina 2,5), 221,2 ± 2,8 nm (Fina 5) e 126,96 ± 0,48 nm (Fina 10), com índices de polidispersidade estreitos e homogêneos (PdI entre 0,153 e 0,367). As análises de potencial zeta confirmaram cargas superficiais negativas estáveis de -28,0 ± 1,0 mV (Fina 2,5), -22,4 ± 1,5 mV (Fina 5) e -20,5 ± 0,5 mV (Fina 10), garantindo forte repulsão eletrostática. O tamanho nanométrico alcançado (abaixo de 300 nm) e a carga superficial conferem perfil ideal para o direcionamento folicular , permitindo o acúmulo localizado do ativo no couro cabeludo, o que minimiza a absorção sistêmica e reduz a citotoxicidade em queratinócitos e fibroblastos.

Palavras-chave: Fibroína.Finasterida.Nanopartículas poliméricas.Alopecia androgenética

TITLE: Obtaining Silk Fibroin/5-Alpha-Reductase Inhibitor Nanocapsules for the Treatment of Alopecia

Abstract

This study describes the development and physicochemical characterization of silk fibroin (Bombyx mori) nanoparticles obtained from textile waste for the encapsulation and controlled release of finasteride, aiming at the topical treatment of androgenetic

alopecia (AGA). Fibroin was isolated by thermal degumming of the cocoons and purified by dialysis. The nanoparticles were prepared by the desolvation-nanoprecipitation method via dropwise addition into ethanol under constant stirring at room temperature, evaluating three samples with different drug concentrations (Fina 2.5, Fina 5, and Fina 10). UV-Vis spectroscopy assays validated the linearity of the finasteride calibration curve in the presence of the surfactant Pluronic. Physical characterization by Dynamic Light Scattering (DLS) revealed mean hydrodynamic diameters of 151.2 ± 0.5 nm (Fina 2.5), 221,2 ± 2,8 nm (Fina 5), and 126,9 ± 0,48 (Fina 10), with narrow and homogeneous polydispersity indices (PdI between 0,153 and 0,367). Zeta potential analyses confirmed stable negative surface charges of -28,0 ± 1,0 mV (Fina 2.5), -22,4 ± 1,5 mV (Fina 5), and -20,5 ± 0,5 mV (Fina 10), ensuring strong electrostatic repulsion. The achieved nanometric size (below 300 nm) and surface charge provide an ideal profile for follicular targeting, allowing localized accumulation of the active ingredient in the scalp, which minimizes systemic absorption and reduces cytotoxicity in keratinocytes and fibroblasts.

Keywords: Fibroin. Finasteride. Polymeric nanoparticles. Androgenetic alopecia

Introdução

Nas últimas décadas, a indústria cosmética tem registrado um crescimento expressivo global, impulsionada por uma demanda crescente dos consumidores por formulações que sejam não apenas altamente eficazes, mas também seguras e ecologicamente sustentáveis (KOUASSI; GRISEL; GORE, 2022). Estima-se que o mercado global de cosméticos alcance receitas superiores a 800 bilhões de dólares (OLIVEIRA et al., 2022). Diante deste cenário, o setor é desafiado a desenvolver produtos de alto desempenho que incorporem matérias-primas renováveis, alinhando-se aos princípios do desenvolvimento sustentável e da redução do impacto ambiental, e consequentemente, a busca por novas tecnologias (MARTINS; MARTO, 2023). Entre as abordagens mais promissoras, a nanotecnologia destaca-se pelo desenvolvimento de sistemas de liberação controlada, com ênfase em sistemas matriciais poliméricos, como as nanoesferas e nanocápsulas (OLIVEIRA et al., 2022; YU et al., 2023). Esses carreadores de dimensão nanométrica são capazes de proteger moléculas ativas sensíveis contra a degradação física e química, modulando suas taxas de liberação e estendendo seu tempo de ação (GUPTA et al., 2022). Além disso, as nanopartículas aumentam consideravelmente a permeação do estrato córneo, que é a barreira cutânea que limita naturalmente a passagem de compostos livres, e favorecem a retenção nos tecidos foliculares (KOUASSI; GRISEL; GORE, 2022; OLIVEIRA et al., 2022) Esse fenômeno aumenta a biodisponibilidade local e reduz as doses necessárias para o sucesso do tratamento, consolidando a popularidade dos "nanocosméticos" em formulações destinadas ao tratamento da pele e dos cabelos (FRANÇA, 2016; GUPTA et al., 2022; SANTOS et al., 2026). Uma aplicação de grande relevância clínica para esses sistemas nanoestruturados reside no tratamento da alopecia androgenética (AAG), uma condição dermatológica comum que se caracteriza pela perda gradual de cabelo, influenciada por fatores genéticos e pela ação local da di-hidrotestosterona (DHT),um hormônio que enfraquece a raiz do cabelo (PALMIERI et al., 2020). O principal fármaco utilizado no manejo da AAG é a finasterida, que atua como inibidor específico da enzima 5α-redutase do tipo II, bloqueando a conversão da testosterona em DHT (KIM et al., 2019; ROSSI; CARO, 2024). Contudo, sua

administração diária por via oral é frequentemente associada a efeitos adversos sistêmicos de longa duração (KIM et al., 2019; PALMIERI et al., 2020). Por outro lado, a administração tópica convencional é limitada pela baixa solubilidade aquosa do fármaco, o que pode comprometer sua penetração através da pele e sua adequada deposição nas unidades pilossebáceas (PALMIERI et al., 2020; WEIDE; MILÃO, 2009).

A fim de superar esses desafios, a fibroína da seda (SF), uma proteína estrutural obtida principalmente dos casulos do bicho-da-seda Bombyx mori, surge como um biomaterial bastante promissor para a criação de novos sistemas de liberação de medicamentos (FRANÇA, 2016; SANTOS et al., 2026; YU et al., 2023). Trata-se de um polímero natural aprovado pela FDA, amplamente reconhecido por sua notável biocompatibilidade, biodegradabilidade não tóxica e resistência mecânica (FRANÇA, 2016; SANTOS et al., 2024; YU et al., 2023). Embora vários sistemas lipídicos e poliméricos tenham sido propostos para veiculação de ativos capilares, as pesquisas focadas no desenvolvimento de carreadores baseados em fibroína especificamente para a nanoencapsulação da finasterida ainda são escassas (FRANÇA, 2016).

Metodologia

1. Isolamento e Purificação da Fibroína da Seda (SF)

Para o isolamento da fibroína de seda pura, os casulos de Bombyx mori foram submetidos a um processo de degomagem térmica para a remoção da sericina. Preparou-se uma solução de carbonato de sódio (Na2CO3) 0,5 M, na proporção de 5,3 g de carbonato para 1000 mL de água. Esta solução foi aquecida até atingir a temperatura de 70 °C, e então os casulos foram adicionados e mantidos sob aquecimento por 30 minutos. Ao término de cada período, as fibras degomadas foram transferidas para outro béquer e lavadas com água destilada, sendo este ciclo de aquecimento e lavagem repetido 3 vezes.

A dissolução da fibroína degomada foi realizada utilizando uma solução ternária composta por cloreto de cálcio (CaCl2), etanol e água destilada. A solução ternária foi preparada pesando-se 12,95 g de cloreto de cálcio, adicionando-se 13,31 mL de água até a dissolução completa do sal, seguido pela adição de 10,75 mL de etanol. Em seguida, pesou-se 3,475 g de fibroína degomada, mantendo-se a proporção de 1 g de fibra para cada 10 g de solução ternária. Essa mistura solvente foi aquecida sob agitação até atingir 60 °C em um béquer vedado com placa de Petri e uma parte envolta com filme plástico para minimizar a perda de etanol por evaporação. Ao atingir a temperatura de 60 °C, a fibroína degomada foi adicionada aos poucos e mantida sob agitação constante até a dissolução completa das fibras, em um tempo reacional esperado de 1 hora. Para a purificação, a solução obtida foi colocada em membranas de diálise e submetida a banho de água destilada por 3 dias, com trocas de água realizadas duas vezes ao dia. Por fim, a dispersão purificada foi centrifugada por 30 minutos a 4000 rpm para remoção de resíduos insolúveis e impurezas.

2. Preparo da Solução de Finasterida e Curva de Calibração

Para avaliar o comportamento coloidal do fármaco, foram preparadas quatro amostras, sendo duas contendo 0,008 g de finasterida e duas contendo 0,004 g. Para cada concentração, uma amostra foi preparada com 0,04 g de Pluronic e outra sem, utilizando-se 3 mL de etanol em todas as formulações. As amostras sem Pluronic foram mantidas sob agitação durante 2 horas, enquanto as amostras contendo o ativo permaneceram sob agitação por 4 horas no total, sendo as primeiras 2 horas realizadas antes da adição do Pluronic e as 2 horas seguintes após sua adição.

Após o preparo, as quatro formulações foram analisadas por espectroscopia no UV-Vis. Para essa análise inicial, as amostras foram previamente diluídas, utilizando-se 100 µL da solução e 1900 µL de etanol, totalizando 2 mL de solução para análise, correspondente a uma diluição de 1:20. A partir da comparação dos espectros obtidos, foi selecionada a formulação contendo 0,008 g de finasterida e 0,04 g de Pluronic, que apresentou o melhor resultado de absorbância. Com base nessa formulação, foi elaborada a curva de calibração da finasterida.

3. Formação e Obtenção das Nanopartículas

Para a formação física das nanopartículas poliméricas contendo finasterida, foram formuladas três suspensões com concentrações distintas do ativo (2,5, 5 e 10 mg/L). Inicialmente, determinou-se o teor de sólidos da fibroína secando-se uma alíquota de 1 mL da solução de fibroína em estufa. Em seguida, a solução foi corrigida para a concentração de 3%. Na sequência, preparou-se a fase aquosa ativa contendo uma mistura homogeneizada de 90,9% da solução de fibroína (corrigida a 3%) e 0,91% da solução de finasterida.

A obtenção das nanopartículas deu-se pelo método de nanoprecipitação por desolvação, adicionando-se a mistura homogênea de fibroína e finasterida gota a gota em etanol absoluto sob agitação magnética constante e à temperatura ambiente. Adotou-se a proporção volumétrica de 80% de etanol para 20% da solução ativa de fibroína+finasterida, mantendo-se o sistema sob agitação por 20 minutos para a completa precipitação e estruturação das partículas. Em seguida, as suspensões foram centrifugadas por 30 minutos a 3600 rpm para a decantação e isolamento das nanopartículas. As partículas isoladas foram submetidas às análises de espalhamento de luz dinâmico (DLS), para determinação do diâmetro hidrodinâmico médio, e de potencial zeta, para avaliação da carga superficial das partículas.

4- Caracterização Física das Nanopartículas de Fibroína de Seda e Finasterida (DLS e Potencial Zeta)

As suspensões de nanopartículas contendo finasterida, correspondentes às formulações Fina 2,5, Fina 5 e Fina 10, foram caracterizadas por Espalhamento de Luz Dinâmico (DLS) para determinação do diâmetro hidrodinâmico médio e do índice de polidispersidade (PdI). As mesmas amostras foram submetidas à análise de potencial zeta, visando avaliar a carga superficial das partículas.

As partículas foram previamente isoladas por centrifugação e posteriormente dispersas para a realização das análises.

5 - Caracterização Química por FTIR.

As soluções de finasterida nas concentrações de 0,008 e 0,004 g, preparadas com e sem Pluronic, foram submetidas à análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Também foram analisadas a fibroína de seda e as nanopartículas contendo finasterida, correspondentes às formulações Fina 2,5 e Fina 5. Os espectros foram obtidos para comparação dos perfis de absorção das diferentes amostras e identificação das principais bandas características dos componentes e das formulações obtidas.

Resultados e Discussões

1. Caracterização Química e Determinação do Perfil de Absorbância da Finasterida (UV-Vis)

Inicialmente, foi avaliado o perfil de absorbância da finasterida por espectroscopia no UV-Vis, comparando diferentes concentrações do fármaco na presença e ausência de Pluronic. A formulação contendo 0,008 g de finasterida e 0,04 g de Pluronic em 3 mL de etanol apresentou o perfil de absorbância mais definido e estável, sendo selecionada para a construção da curva de calibração.

A presença do Pluronic favoreceu a obtenção de um perfil de absorbância mais definido para a finasterida em etanol. A curva de calibração apresentou comportamento linear até 50 mg/L, demonstrando a relação entre a concentração do fármaco e a absorbância nas condições avaliadas (GUPTA et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2022).

2. Caracterização Física das Nanopartículas de Fibroína de Seda e Finasterida (DLS e Potencial Zeta)

Após a preparação das suspensões poliméricas de fibroína de seda contendo finasterida por meio do método de nanoprecipitação por desolvação com gotejamento em etanol absoluto, as amostras foram caracterizadas quanto ao seu diâmetro hidrodinâmico médio, índice de polidispersidade (PdI) e potencial zeta (ZP) via Espalhamento de Luz Dinâmico (DLS). Foram preparadas e analisadas três formulações identificadas como Fina 2,5, Fina 5 e Fina 10, cujos resultados experimentais estão sintetizados na Tabela 1.

Os diâmetros médios obtidos foram de 151,2 ± 0,5 nm, 221,2 ± 2,8 nm e 126,9 ± 0,48 nm para Fina 2,5, Fina 5 e Fina 10, respectivamente. Todas as formulações apresentaram tamanho inferior a 250 nm, confirmando a obtenção de partículas em escala nanométrica. A Fina 10 apresentou o menor diâmetro, enquanto a Fina 5 apresentou o maior. Essa variação indica que o aumento da concentração de finasterida não promoveu uma alteração linear no tamanho das partículas, podendo estar relacionado às interações entre o fármaco e a fibroína durante o processo de desolvação. A composição e as características estruturais da fibroína permitem diferentes interações com moléculas incorporadas, podendo influenciar a formação e o tamanho das partículas (YU et al., 2023).

O índice de polidispersidade (PdI) variou entre 0,153 e 0,367 para as três suspensões obtidas. Na ciência coloidal, valores de PdI inferiores a 0,4 indicam que as suspensões apresentam homogeneidade de tamanho satisfatória e distribuição monodispersa aceitável, o que é um parâmetro crítico para assegurar a estabilidade física do sistema contra fenômenos de coalescência e sedimentação durante o armazenamento (GUPTA et al., 2022; PALMIERI et al., 2020).

Com relação ao potencial zeta, todas as suspensões exibiram cargas superficiais líquidas negativas expressivas, com valores médios de -28,0 ± 1,0 mV para Fina 2,5, -22,4 ± 1,5 mV para Fina 5 e -20,5 ± 0,5 mV para Fina 10. A literatura atribui essa carga negativa superficial à exposição dos grupos carboxila terminais livres dos resíduos hidrofílicos de ácido aspártico e glutâmico presentes na estrutura molecular da fibroína de seda (NHANI et al., 2024; YU et al., 2023)(NHANI et al., 2024; YU et al., 2023). Valores de potencial zeta próximos ou superiores a -20 mV fornecem repulsão eletrostática mútua adequada entre as nanopartículas, minimizando de forma eficiente a atração de van der Waals e impedindo a agregação espontânea do sistema coloidal (GUPTA et al., 2022; NHANI et al., 2024).

3. Caracterização Química por FTIR.

Os espectros de FTIR das soluções de finasterida apresentaram perfis semelhantes entre as formulações contendo 0,008 e 0,004 g do fármaco, com e sem Pluronic. Foram observadas bandas nas regiões de aproximadamente 3300, 3000, 1650, 1450 e 1000 cm^{-1}. A presença do Pluronic não promoveu alterações expressivas nas principais regiões de absorção da finasterida, indicando a manutenção de seu perfil químico nas condições avaliadas. As diferenças de intensidade observadas entre os espectros podem estar relacionadas às diferentes concentrações do fármaco e à presença do tensoativo.

Para as nanopartículas, a fibroína apresentou banda em 1643,756 cm^{-1}, enquanto as nanopartículas identificadas Nano 2,5 , Nano 5 e Nano 10 apresentaram bandas em 1045,5183, 1041,7909 e 1041,7909 cm^{-1}, respectivamente. A banda em 1643,756 cm^{-1} está associada à região de amida I, relacionada ao estiramento da ligação C=O das cadeias peptídicas. Na fibroína, essa região pode ser utilizada para avaliar alterações conformacionais, sendo a faixa de 1638–1655 cm^{-1} associada à conformação seda I, enquanto bandas em menores números de onda podem indicar maior contribuição de estruturas em folha-β (FRANÇA, 2016).

A formação das nanopartículas ocorreu em meio contendo etanol, que pode induzir alterações conformacionais na fibroína e favorecer a formação da estrutura seda II, caracterizada pela presença de folhas-β. França (2016) observou que o tratamento da fibroína com etanol promoveu maior predominância dessa conformação, associada a uma estrutura mais estável. Dessa forma, as diferenças observadas entre o espectro da fibroína e das formulações Fina 2,5 e Fina 5 podem estar relacionadas às alterações estruturais provocadas pelo processo de desolvação. As pequenas diferenças entre as duas formulações também indicam que a variação da concentração de finasterida não promoveu alterações expressivas no perfil espectral das nanopartículas.

Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da obtenção de nanopartículas de fibroína de seda contendo finasterida pelo método de nanoprecipitação por desolação. A análise por UV-Vis permitiu estabelecer uma curva de calibração com comportamento linear até 50 mg/L, enquanto a caracterização por DLS evidenciou partículas em escala nanométrica nas três formulações avaliadas.

Entre as formulações, a Fina 10 apresentou o menor diâmetro hidrodinâmico (126,9 ± 0,48 nm) e o menor PdI (0,153 ± 0,01), indicando maior uniformidade da população de partículas. As formulações também apresentaram potencial zeta negativo, com valores entre −20,5 e −28,0 mV, demonstrando a presença de carga superficial negativa.

As análises por FTIR permitiram comparar as soluções de finasterida com e sem Pluronic e avaliar as alterações no perfil espectroscópico da fibroína após a formação das nanopartículas. De modo geral, os resultados obtidos indicam a formação de sistemas nanoparticulados de fibroína com características físico-químicas promissoras para a aplicação proposta. Entretanto, não foram realizadas análises suficientes para determinar a eficiência de encapsulação, perfil de liberação ou desempenho tópico das formulações, sendo necessários estudos complementares para confirmar essas propriedades.

Referências

FRANÇA, C. G. Obtenção e caracterização de esferas de fibroína de seda e glucomanana de konjac para aplicações biotecnológicas. 2016. [s. l.], 2016.

GUPTA, V.; MOHAPATRA, S.; MISHRA, H.; FAROOQ, U.; KUMAR, K.; ANSARI, M.; ALDAWSARI, M.; ALALAIWE, A.; MIRZA, M.; IQBAL, Z. Nanotechnology in Cosmetics and Cosmeceuticals—A Review of Latest Advancements. Gels, v. 8, n. 3, p. 173, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/gels8030173

KIM, J. et al. Development of finasteride polymer microspheres for systemic application in androgenic alopecia. International Journal of Molecular Medicine, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3892/ijmm.2019.4149

KOUASSI, M.-C.; GRISEL, M.; GORE, E. Multifunctional active ingredient-based delivery systems for skincare formulations: A review. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, v. 217, p. 112676, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112676

MARTINS, A. M.; MARTO, J. M. A sustainable life cycle for cosmetics: From design and development to post-use phase. Sustainable Chemistry and Pharmacy, n. 35, p. 101178, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101178

NHANI, G. B. B.; DI FILIPPO, L. D.; DE PAULA, G. A.; MANTOVANELLI, V. R.; DA FONSECA, P. P.; TASHIRO, F. M.; MONTEIRO, D. C.; FONSECA-SANTOS, B.;

DUARTE, J. L.; CHORILLI, M. High-Tech Sustainable Beauty: Exploring Nanotechnology for the Development of Cosmetics Using Plant and Animal By-Products. Cosmetics, v. 11, n. 4, p. 112, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/cosmetics11040112

OLIVEIRA, C.; COELHO, C.; TEIXEIRA, J. A.; FERREIRA-SANTOS, P.; BOTELHO, C. M. Nanocarriers as Active Ingredients Enhancers in the Cosmetic Industry—The European and North America Regulation Challenges. Molecules, v. 27, n. 5, p. 1669, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/molecules27051669

PALMIERI, M. G. S.; FERREIRA, K. C. B.; VALLE, A. B. C. S.; ALEIXO, D. T.; TAVARES, G. D.; CORRÊA, J. O. A.; PITTELLA, F. Development of nanostructured lipid carriers containing finasteride. Brazilian Journal of Health and Pharmacy, v. 2, n. 1, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.29327/226760.2.1-3

ROSSI, A.; CARO, G. Efficacy of the association of topical minoxidil and topical finasteride compared to their use in monotherapy in men with androgenetic alopecia: A prospective, randomized, controlled, assessor blinded, 3-arm, pilot trial. Journal of Cosmetic Dermatology, v. 23, n. 2, p. 502–509, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jocd.15953

SANTOS, C. M.; SANTOS, T. F.; RAO, H. J.; SILVA, F. H. V. A.; MAVINKERE RANGAPPA, S.; BOONYASOPON, P.; SIENGCHIN, S.; SOUZA, D. F. S.; NASCIMENTO, J. H. O. A bibliometric review on applications of lignocellulosic fibers in polymeric and hybrid composites: Trends and perspectives. Heliyon, v. 10, n. 19, p. e38264, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38264

SANTOS, C. M.; SANTOS, T. F.; TIWARI, S.; DA SILVA JÚNIOR, A. A.; NASCIMENTO, J. H. O. Valorization of Silkworm Cocoons into Sustainable Nanomaterials: Applications and Challenges. ACS Biomaterials Science & Engineering, v. 12, n. 8, p. 3887–3906, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.6c00221

WEIDE, A. C. .; MILÃO, D. A utilização da Finasterida no Tratamento da Alopécia Androgenética. Revista da Graduação, v. 2, n. 1, 2009.

YU, B.; LI, Y.; LIN, Y.; ZHU, Y.; HAO, T.; WU, Y.; SUN, Z.; YANG, X.; XU, H. Research progress of natural silk fibroin and the application for drug delivery in chemotherapies. Frontiers in Pharmacology, v. 13, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fphar.2022.1071868

Anexos



Figura 1 - Gráfico UV-VIS



Figura 2 - Curva de calibração



Tabela 1 - Resultados DLS e Potencial zeta



Figura 3 - Distribuição de tamanho da nanopartícula com concentração de 2,5mg/L de finasterida



Figura 4 - Distribuição de tamanho da nanopartícula com concentração de 5mg/L de finasterida



Figura 5 - Distribuição de tamanho da nanopartícula com concentração de 10mg/L de finasterida



Figura 6 - Distribuição de potencial zeta da nanopartícula com concentração de 2,5mg/L de finasterida



Figura 7 - Distribuição de potencial zeta da nanopartícula com concentração de 5mg/L de finasterida



Figura 8 - Distribuição de potencial zeta da nanopartícula com concentração de 10mg/L de finasterida



Figura 9 - Gráfico FTIR de soluções de finasterida



Figura 10 - Gráfico FTIR de nanopartículas e solução de fibroína.



Tabela 2: Resultados de número de onda de nanopartículas e solução de fibroína.

CÓDIGO: ET1378

AUTOR: DAIANE DE LIMA TEIXEIRA

COAUTOR: NATHALIA SARAIVA RIOS

COAUTOR: FRANCISCO BRUNO FERREIRA DE FREITAS

ORIENTADOR: EVERALDO SILVINO DOS SANTOS

TÍTULO: Influência de fatores ambientais na biodegradação de hidrocarbonetos por bactérias imobilizadas em suportes lignocelulósicos.

Resumo

Devido ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico, houve um aumento na demanda mundial por gás natural e derivados de petróleo. O óleo diesel, derivado do petróleo, representa uma grande fonte de contaminação ambiental devido a acidentes ocorridos durante processos de exploração, transporte e refino. A biorremediação por biodegradação surge como alternativa sustentável e de baixo custo às técnicas físico-químicas convencionais, e a imobilização de microrganismos em suportes lignocelulósicos como a fibra de coco, tem se mostrado uma estratégia eficaz para suprir as limitações associadas ao uso de células livres. Este trabalho teve como objetivo avaliar a biodegradação de óleo diesel pela bactéria *Pseudomonas aeruginosa* AP029-GLVIIA imobilizada em fibra de coco pré-tratada com NaOH 2%, buscando estabelecer condições favoráveis à biorremediação. A imobilização foi confirmada por MEV, evidenciando a adesão celular nos poros do suporte pré-tratado, com maior densidade celular observada em 24 horas de contato ($6{,}97 \times 10^8$ UFC/g). Os ensaios de biodegradação, monitorados por CG-MS e por espectrofotometria, mostraram a redução da fração de alcanos e aumento de ácidos graxos e ésteres nos tratamentos bióticos em relação ao controle abiótico, tanto para células livres quanto imobilizadas, enquanto os compostos aromáticos apresentaram maior resistência à degradação. Os resultados confirmam a viabilidade da fibra de coco pré-tratada como suporte para imobilização bacteriana.

Palavras-chave: Biorremediação; Pseudomonas aeruginosa; Imobilização.

TITLE: Influence of environmental factors on hydrocarbon biodegradation by bacteria immobilized on lignocellulosic supports.

Abstract

Due to population growth and economic development, global demand for natural gas and petroleum derivatives has increased. Diesel oil, a petroleum derivative, represents a major

source of environmental contamination due to accidents occurring during exploration, transportation, and refining processes. Bioremediation via biodegradation emerges as a sustainable and low-cost alternative to conventional physicochemical techniques, and the immobilization of microorganisms on lignocellulosic supports, such as coconut fiber, has proven to be an effective strategy to overcome the limitations associated with the use of free cells. This study aimed to evaluate the biodegradation of diesel oil by the bacterium *Pseudomonas aeruginosa* AP029-GLVIIA immobilized on coconut fiber pretreated with 2% NaOH, seeking to establish favorable conditions for bioremediation. Immobilization was confirmed by SEM, showing cellular adhesion within the pores of the pretreated support, with the highest cell density observed after 24 hours of contact ($6.97x10^8$ CFU/g). Biodegradation assays, monitored by GC-MS and spectrophotometry, showed a reduction in the alkane fraction and an increase in fatty acids and esters in biotic treatments compared to the abiotic control, for both free and immobilized cells, while aromatic compounds showed greater resistance to degradation. The results confirm the feasibility of pretreated coconut fiber as a support for bacterial immobilization.

Keywords: Bioremediation; Pseudomonas aeruginosa; Immobilization.

Introdução

Nas últimas décadas, devido ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico, houve um aumento na demanda mundial por gás natural e derivados de petróleo. O petróleo e seus derivados, como o óleo diesel, possuem um papel fundamental no desenvolvimento econômico e energético global. No entanto, atividades operacionais de exploração, transporte e refino acabam estando propícias a acidentes que acarretam o despejo indevido desses contaminantes nos ecossistemas terrestres e marinhos (Nhi-Cong et al., 2021). Entre as frações mais tóxicas presentes nos derivados de petróleo, destacam-se os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs) e os componentes do óleo diesel, caracterizados por terem baixa solubilidade em água e serem um potencial mutagênico e carcinogênico para a saúde humana e biota local (Liang et al., 2021; Zhang et al., 2022).

Para conter e fazer a remediação desses locais impactados, os métodos químicos e físicos convencionais são frequentemente aplicados. Entretanto, apresentam alto custo financeiro e podem gerar resíduos secundários nocivos ao meio ambiente (Yin et al., 2023). Nesse contexto, as técnicas de biorremediação via biodegradação surgem como alternativas com alta eficiência, sustentabilidade e menor custo (Liang et al., 2021). Apesar dessas vantagens, a introdução de bactérias livres em ambientes contaminados possui algumas limitações, como a baixa adaptabilidade a variações do meio, a competição com a microbiota nativa e a predação por outros microrganismos presentes (Chen et al., 2023; Yin et al., 2023).

Uma estratégia que vem se mostrado promissora para reduzir essas limitações é a imobilização de microrganismos em materiais de suporte. Essa técnica tem como objetivo trazer a retenção celular e a formação de biofilme, garantindo uma maior densidade celular, maior tolerância a estresses ambientais e a concentração dos poluentes na superfície do suporte por processos de adsorção, o que otimiza a biodegradação (Nhi-Cong et al., 2021; Che Man et al., 2024). O uso de resíduos lignocelulósicos, como a fibra de coco, apresenta vantagens adicionais por se tratar de suportes abundantes, renováveis, biodegradáveis e de baixo custo (Chen et al., 2023; Ribeiro et al., 2024). O pré-tratamento

alcalino dessas biomassas desestrutura a sua parede celular, aumentando a área superficial e melhorando a adesão microbiana (Ribeiro et al., 2024).

Além do suporte utilizado, outros fatores que influenciam a eficiência do processo de biodegradação são os ambientais do meio contaminado, como temperatura, pH e salinidade (Liu et al., 2022; Xu et al., 2023); Mudanças na temperatura que afetam a fluidez da membrana e a cinética de enzimas catabólicas (Santos et al., 2023); Alterações no pH alteram o estado de ionização de substratos e enzimas (Liu et al., 2022); e a salinidade cria estresse osmótico na célula que pode inibir a atividade metabólica bacteriana (Xu et al., 2023). Portanto, o estudo dessas variáveis é fundamental para determinar as formas ideais para aplicação da biorremediação em ecossistemas de água doce ou salgada.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência de fatores ambientais (temperatura, pH e salinidade) e suas interações na taxa de biodegradação de óleo diesel pela bactéria *Pseudomonas aeruginosa* AP029-GLVIIA imobilizada em suportes lignocelulósicos (fibra de coco), buscando estabelecer melhores condições de Biorremediação.

Metodologia

Todos os reagentes e solventes utilizados foram de grau analítico. Para o preparo do meio de cultivo e simulação das condições ambientais, utilizou-se o meio mineral Bushnell Haas (BH) e os sais cloreto de sódio (NaCl), cloreto de magnésio (MgCl2), cloreto de cálcio (CaCl2) e cloreto de potássio (KCl). O óleo diesel comercial foi utilizado como substrato e fonte de carbono nos ensaios de biodegradação. A biomassa lignocelulósica utilizada foi a fibra de coco verde, cedida por uma empresa local de água de coco. O microrganismo utilizado nos ensaios foi a cepa *Pseudomonas aeruginosa* AP029-GLVIIA, isolada de amostras de água de formação provenientes de um poço de petróleo localizado em Canto do Amaro (Mossoró/RN) e pertencente à coleção de culturas do Laboratório de Engenharia Bioquímica (LEB) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). A cepa é mantida em ultracongelador a -80 °C, em tubos Eppendorf contendo solução de glicerol a 20% (v/v).

Antes da imobilização do microrganismo, as cascas de coco foram cortadas em tamanhos menores para facilitar o processamento em moinho de facas. O material moído foi submetido a peneiramento granulométrico, selecionando-se as frações retidas entre as peneiras de 20 e 48 mesh. Em seguida, a biomassa passou por pré-tratamento alcalino, sendo misturada com solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 2% (m/v) sob carga de sólidos de 10% (m/v) e submetida à autoclavagem a 121 °C por 60 minutos, para desestruturação da matriz lignocelulósica e exposição dos poros. Após o tratamento, a fibra foi filtrada e lavada com água destilada até atingir pH neutro, seca em estufa a 60 °C e, por fim, esterilizada em autoclave a 121 °C por 20 minutos.

As biomassas in natura e pré-tratada foram caracterizadas físico-quimicamente quanto aos teores de umidade (%), cinzas totais (%), extraíveis totais (%), polissacarídeos

(celulose e hemicelulose, %) e lignina insolúvel (%), conforme metodologia descrita por Ribeiro (2022).

Para determinar o tempo ideal de contato entre o suporte pré-tratado e a bactéria, visando aumentar a retenção de células viáveis, foram realizados ensaios de cinética de imobilização. Em frascos Erlenmeyer de 250 mL, adicionou-se o suporte pré-tratado na proporção de 10% (m/v) e meio Luria Bertani (LB, composto por 10 g/L de triptona, 5 g/L de extrato de levedura e 5 g/L de NaCl). O meio foi inoculado com suspensão celular do estoque de glicerol a 1% (v/v) (1 g/L) e incubado em shaker a 30 °C e 150 rpm.

Em intervalos predefinidos (12, 24 e 48 horas), as amostras do suporte foram removidas e lavadas com tampão fosfato de sódio 5 mM (pH 7,0) por cerca de 20 minutos, para eliminar as células fracamente aderidas à superfície. A quantificação das células viáveis imobilizadas foi feita suspendendo o suporte em tampão PUM (fosfato, ureia e magnésio) sob agitação por 30 minutos, promovendo o desprendimento das células aderidas. A suspensão resultante foi submetida a diluições seriadas e plaqueada em ágar nutriente, seguida de incubação a 35 °C por 24 horas. As colônias foram contadas e os resultados expressos em Unidades Formadoras de Colônia por grama de suporte (UFC/g). O tempo de 24 horas, que apresentou a maior densidade celular, foi utilizado no preparo dos imobilizados para os ensaios seguintes. Após essa etapa, os suportes contendo as bactérias imobilizadas foram filtrados e enxaguados com água destilada estéril, para remoção de resíduos do meio nutritivo.

Em seguida, confirmou-se a adesão microbiana e as alterações morfológicas na superfície da fibra por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Para essa análise, as amostras de suporte (in natura, pré-tratada e imobilizada) foram imersas em solução de glutaraldeído a 2,5% por 2 horas, para fixação celular, enxaguadas com água destilada e desidratadas por imersão sequencial em soluções de etanol em concentrações crescentes (10%, 30%, 50%, 70%, 80%, 90% e 100% v/v), por 30 minutos em cada etapa. Após a secagem, os materiais foram revestidos com uma fina camada de ouro e encaminhados para captura das micrografias no MEV.

Também foi realizada análise de estabilidade térmica dos sistemas imobilizados em comparação às células livres, submetendo os materiais a temperaturas elevadas em diferentes intervalos de tempo e determinando a manutenção da viabilidade celular em meio sólido (UFC/g) como resposta principal. Os ensaios de biodegradação foram realizados em erlenmeyers de vidro de 250 mL, tampados com tampão de algodão. Os cultivos foram realizados em meio mineral líquido Bushnell Haas (BH), ajustado para as condições de pH e salinidade de cada corrida experimental, suplementado com óleo diesel comercial a 1% (v/v) como única fonte de carbono e energia.

Os frascos contendo o meio e o suporte imobilizado foram mantidos em incubadora sob agitação constante de 150 rpm por 20 dias. As amostragens foram feitas em 5, 10, 15 e 20 dias de incubação, monitorando-se a taxa de remoção do contaminante e a contagem de células viáveis (UFC/mL e UFC/g). Para quantificação dos hidrocarbonetos residuais e identificação dos subprodutos de degradação, realizou-se extração líquido-líquido das amostras do meio utilizando hexano. A fração orgânica extraída foi analisada por Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (CG/MS), para determinar o percentual de remoção do óleo diesel e a distribuição percentual das principais classes químicas presentes ao longo do processo.

Todos os ensaios foram realizados em duplicata. Os dados obtidos foram expressos como média e desvio padrão, sendo submetidos à Análise de Variância a um nível de significância de 95%, para identificar os efeitos principais e as interações significativas entre temperatura, pH e salinidade. As análises estatísticas e as construções gráficas foram executadas no software Origin Pro 8.5.

Resultados e Discussões

O processo de imobilização foi confirmado analizando as alterações morfológicas na superfície do suporte lignocelulósico, onde foram avaliadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As micrografias da fibra de coco nas condições in natura, pré-tratada e após a incubação com a bactéria *Pseudomonas aeruginosa* AP029-GLVIIA estão apresentadas na Figura 1.

Na Figura 1A, a fibra in natura mostra uma superfície relativamente lisa e uniforme, na qual a estrutura fibrosa interna e os poros não se encontram expostos. Esse aspecto é devido à presença de uma camada recoberta por lignina, extraíveis, celulose e outros componentes que dificultam a fixação celular direta. Com a aplicação do pré-tratamento alcalino (NaOH 2%), a Figura 1B evidencia uma alteração estrutural, com o aumento da porosidade e a desestruturação da camada superficial da biomassa. Essa abertura dos poros e o aumento da área superficial tornam a fibra pré-tratada um material propício para a retenção e colonização dos microrganismos. Na Figura 1C (destacada no quadro azul), é confirmado o sucesso da imobilização do microrganismo, onde é possível observar as células de *Pseudomonas aeruginosa* AP029-GLVIIA, caracterizadas como pequenas estruturas arredondadas (bacilos), fixadas no interior dos poros da fibra de coco pré-tratada, demonstrando a eficiência do suporte.

Em relação a cinética de imobilização, o tempo de 24 horas foi o ponto com maior densidade celular (6,97x108 UFC/g), mostrando uma melhor adesão do microrganismo no suporte. Houve uma queda de crescimento no tempo de 48 horas (7,15x106 UFC/g) mostrando que pode ter ocorrido um desprendimento celular decorrente da saturação dos sítios de ligação, limitações na difusão de nutrientes e oxigênio ou à dinâmica natural de formação e dispersão do biofilme.

Para determinar o melhor tempo de contato entre a bactéria e o suporte pré-tratado que aumente a quantidade de células viáveis retidas, foi feito o monitoramento da densidade celular no suporte ao longo de 48 horas. Os resultados obtidos nos ensaios de cinéticas de imobilização estão dispostos na Tabela 1. C0: Controle abiótico (tempo zero); C5: Controle abiótico (5 dias de degradação); C10: Controle abiótico (10 dias de degradação); PA5: Degradação usando bactéria livre (5 dias de degradação); PA10: Degradação usando bactéria livre (10 dias de degradação); PAI10: Degradação usando bactéria imobilizada (10 dias de degradação).

Em relação à biodegradação do óleo diesel, a cromatografia (CG/MS) comprovou a atuação direta da P. aeruginosa na quebra das moléculas do combustível. Houve a redução da classe dos alcanos nos tratamentos bióticos, alcançando 49,10% com as células livres (PA10) e 55,30% com as células imobilizadas (PAI10), em seguida a 58,60% no controle abiótico (C10) mostra a preferência da bactéria pelas cadeias alifáticas saturadas.

Também houve o aumento de ácidos graxos e ésteres no meio reacional, aumentando de 11,95% no tempo zero (C0) para 37,90% nas células livres (PA10) e 30,50% no sistema imobilizado (PAI10) ao final de 10 dias. Por outro lado, os hidrocarbonetos aromáticos não apresentaram redução significativa, sugerindo maior resistência à biodegradação nas condições avaliadas, uma vez que compostos aromáticos, especialmente os policíclicos, requerem vias metabólicas mais complexas para sua degradação. Essa diferença pode ser explicada por limitações na transferência de massa em relação ao biocatalisador imobilizado.

Como forma de acompanhamento complementar da remoção do óleo diesel, foi avaliada a absorbância no comprimento de onda de 250 nm após feita a recuperação do hexano no período de 10, 15 e 20 dias, utilizada como indicador indireto do teor de material extraível remanescente nas amostras. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

B.I.: bactéria imobilizada. Valores expressos como média de leituras em duplicata. As condições B.I. e diesel foram lidas em diluição 1:10; as demais condições, em diluição 1:20. Os percentuais representam a variação da absorbância em relação ao tempo T10 (0% = referência); valores negativos indicam aumento da absorbância em relação a T10.

De maneira geral, foi observada a redução da absorbância entre os tempos de 10, 15 e 20 dias em todas as condições avaliadas, sugerindo a diminuição do óleo diesel residual. A condição com a bactéria livre em contato direto com o diesel apresentou a maior redução de aproximadamente 10% entre T10 e T20, o que é compatível com o processo contínuo de degradação. Já o controle abiótico (diesel e meio, sem bactéria) apresentou a maior redução relativa (57%), concentrada principalmente entre os tempos de 15 e 20 dias, o que pode ser atribuído à volatilização das frações mais leves do óleo diesel sob agitação constante, fenômeno já reconhecido como fonte relevante de erro em ensaios de biodegradação de diesel conduzidos sob agitação em longos períodos, e não à atividade biológica (Roslee et al., 2021). O resultado indica a importância de se considerar a perda abiótica como fator de correção ao se estimar a taxa real de biodegradação feita pela *P. aeruginosa* AP029-GLVIIA.

Os sistemas contendo meio com bactéria livre e com bactéria imobilizada apresentaram decrescimento entre os tempos de 10 e 15 dias, seguido de aumento parcial da absorbância em 20 dias. Este comportamento pode estar associado à dessorção de frações de óleo que podem ter sido retidas no suporte lignocelulósico, uma vez que materiais porosos utilizados como suporte em processos de biorremediação podem “pegar” temporariamente hidrocarbonetos em sua estrutura, reduzindo sua disponibilidade inicial e os liberando de volta ao meio em momentos posteriores (Chen et al., 2024).

Conclusão

Os resultados obtidos demonstram a eficácia da fibra de coco pré-tratada com NaOH 2% como suporte para a imobilização da bactéria Pseudomonas aeruginosa AP029-GLVIIA, confirmando os estudos que mostram que resíduos lignocelulósicos, como a fibra de coco, são um meio de suporte eficiente, acessível e renovável para a retenção celular (Chen et al., 2023; Ribeiro et al., 2024). Essa eficácia foi confirmada pelas alterações morfológicas

indicadas pelo MEV, que mostrou o aumento da porosidade do material após o pré-tratamento alcalino e a fixação das células bacterianas no interior dos poros, padrão semelhante ao relatado para a imobilização de bactérias em fibra de coco pré-tratada (Che Man et al., 2024). Os ensaios de cinética de imobilização mostraram que o tempo de 24 horas de contato entre o suporte e o microrganismo foi o melhor tempo, com a maior densidade celular retida ($6{,}97 \times 10^8$ UFC/g), sendo esse o tempo mais adequado para o preparo dos sistemas imobilizados. Já em períodos mais longos (48 horas), houve uma queda significativa da viabilidade celular, que pode estar associada à saturação dos sítios de ligação disponíveis no suporte e à dinâmica de formação e desprendimento do biofilme, fenômeno relacionado ao uso de materiais de imobilização em processos de biorremediação (Nhi-Cong et al., 2021).

Em relação à biodegradação, tanto a análise por CG/MS quanto a análise feita pelo espectrofotômetro confirmaram o trabalho exercido pela *P. aeruginosa* AP029-GLVIIA na remoção do óleo diesel, evidenciada pela redução da fração de alcanos e pelo aumento de ácidos graxos e ésteres nos tratamentos bióticos em comparação ao controle abiótico, tanto na condição de células livres quanto imobilizadas. Os compostos aromáticos, por sua vez, apresentaram maior resistência à degradação nas condições avaliadas, reforçando a necessidade de vias metabólicas mais específicas para sua quebra, uma vez que hidrocarbonetos aromáticos policíclicos exigem rotas catabólicas mais complexas para serem degradados por bactérias (Liang et al., 2021). Já os dados obtidos pelo espectrofotômetro indicaram perda abiótica significativa do óleo diesel (57%), provavelmente pela volatilização das frações mais leves sob agitação constante, que é um fenômeno já reconhecido como fonte relevante de erro em ensaios de biodegradação de diesel conduzidos em frascos agitados (Roslee et al., 2021), o que evidencia a importância de considerar esse efeito como fator de correção em ensaios futuros da taxa real de biodegradação atribuída à ação bacteriana. Os resultados confirmam o potencial do sistema bactéria-suporte lignocelulósico como uma estratégia promissora para a biorremediação de ambientes contaminados por óleo diesel, sendo a fibra de coco um material acessível, renovável e eficiente para a retenção celular (Chen et al., 2023; Ribeiro et al., 2024).

Referências

CHE MAN, R.; KHOLIJAH ABDUL MUDALIP, S.; HASMALIANA ABDUL MANAS, N.; ZUBAIDAH SULAIMAN, S. Effect of process parameters on immobilization of recombinant Escherichia coli on coconut fiber. Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology, v. 10, p. 17–24, 2024.

CHEN Y, WANG F, GAO J, HE X, LIU Q, LIU L. Enhancing bioremediation of petroleum-contaminated soil by sophorolipids-modified biochar: Combined metagenomic and metabolomic analyses. Sci Total Environ. 2024 Nov 15;951:175772. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175772. Epub 2024 Aug 25. PMID: 39191326.

CHEN, Y.; ZHANG, L.; WANG, H.; LIU, X. Bioremediation of hydrocarbon-polluted soil by immobilized bacterial consortium on corn cob biochar. Environmental Science and Pollution Research, v. 30, n. 12, p. 34512–34524, 2023.

LIANG, J.; GAO, S.; WU, Z.; RIJNAARTS, H. H. M.; GROTENHUIS, T. DNA-SIP identification of phenanthrene-degrading bacteria undergoing bioaugmentation and natural attenuation in petroleum-contaminated soil. Chemosphere, v. 266, p. 128984, 2021.

LIU, Y.; ZHANG, Z.; SUN, J.; DONG, H. Response surface methodology for optimizing environmental variables in diesel oil biodegradation by Pseudomonas spp. Journal of Environmental Management, v. 315, p. 115120, 2022.

NHI-CONG, L. T.; LIEN, D. T.; MAI, C. T. N.; LINH, N. V.; LICH, N. Q.; HA, H. P.; VAN QUYEN, D.; TANG, D. Y. Y.; SHOW, P. L. Advanced materials for immobilization of purple phototrophic bacteria in bioremediation of oil-polluted wastewater. Chemosphere, v. 278, p. 130464, 2021.

RIBEIRO, V. T.; CAMPOLINA, A. C.; DA COSTA, W. A. et al. Production of ethanol from green coconut fiber using sequential steam explosion and alkaline pretreatment. Biomass Conversion and Biorefinery, v. 14, p. 8579–8589, 2024.

ROSLEE, A. F. A.; GOMEZ-FUENTES, C.; ZAKARIA, N. N.; SHAHARUDDIN, N. A.; ZULKHARNAIN, A.; ABDUL KHALIL, K.; CONVEY, P.; AHMAD, S. A. Growth Optimisation and Kinetic Profiling of Diesel Biodegradation by a Cold-Adapted Microbial Consortium Isolated from Trinity Peninsula, Antarctica. Biology, v. 10, n. 6, p. 493, 2021.

SANTOS, G. R.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, R. C. Temperature and pH stability enhancement of bacterial enzymes via lignocellulosic carrier immobilization. Process Biochemistry, v. 128, p. 142–151, 2023.

XU, X.; HUANG, Y.; ZHANG, P. Salinity tolerance and degradation mechanism of petroleum-degrading bacteria immobilized on organic supports. Marine Pollution Bulletin, v. 191, p. 114910, 2023.

YIN, C.; YAN, H.; CAO, Y.; GAO, H. Enhanced bioremediation performance of diesel-contaminated soil by immobilized composite fungi on rice husk biochar. Environmental Research, v. 226, p. 115663, 2023.

ZHANG, K.; HU, X.; LI, Y.; BIAN, W. Biochar and lignocellulosic supports for microbial cell immobilization: Mechanisms and environmental applications. Bioresource Technology, v. 350, p. 126910, 2022.

Anexos



Figura 1: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fibra de coco: (A) In natura; (B) Pré-tratada e (C) Após o processo de imobilização com ampliação de 3000x.



Tabela 1. Variação na composição química do óleo diesel (% de área por CG-MS) sob diferentes condições de biodegradação.



Tabela 2: Variação percentual da absorbância no comprimento de onda de 250 nm, obtida da recuperação do hexano nos períodos de 10, 15 e 20 dias, em relação ao tempo T10 (referência).

CÓDIGO: ET1386

AUTOR: JAIME ERISON SILVA RIBEIRO

ORIENTADOR: JOSE HERIBERTO OLIVEIRA DO NASCIMENTO

TÍTULO: CARACTERIZAÇÃO DE AEROGEL DE GRAFENO A PARTIR DA BIOMASSA DE CALOTROPIS PROCERA PARA POTENCIAL APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE OLEO

Resumo

A mitigação das emissões de dióxido de carbono é um desafio ambiental urgente. Este estudo apresenta a síntese sustentável de um aerogel de óxido de grafeno reduzido (rGO) derivado da biomassa de Calotropis procera (CP-rGO), funcionalizado com aminas para a captura seletiva de CO_2. O CP-rGO foi obtido via pirólise catalítica a 300 °C com ferroceno. A estrutura tridimensional foi formada pelo método sol-gel, utilizando alginato de sódio e ágar-ágar, seguida de liofilização, processo que preservou a porosidade. A caracterização por DRX e espectroscopia Raman (razão I_D/I_G e 0,49) confirmou a formação de rGO com estrutura parcialmente ordenada e empilhamento desordenado. A análise de FTIR comprovou a eficácia da redução térmica, enquanto a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelou uma morfologia lamelar, altamente porosa e interconectada, derivada da estrutura tubular da fibra da planta. Nos ensaios dinâmicos em leito fixo, a funcionalização da superfície com aminas (APTMS) promoveu a adsorção química do CO_2 nos sítios básicos nitrogenados. Isso potencializou significativamente a capacidade de retenção gasosa em comparação ao aerogel puro, que opera apenas por adsorção física. A estabilidade dos biopolímeros permitiu a regeneração do material. O aerogel funcionalizado combina a sustentabilidade da biomassa com alta performance, sendo uma solução promissora e de baixo custo para tecnologias de captura de carbono.

Palavras-chave: Adsorção de CO2; Aerogel; Óxido de grafeno reduzido; Calotropis procer

TITLE: Synthesis of Graphene Aerogel from Calotropis procera Biomass for Oil Removal Application

Abstract

Mitigating carbon dioxide emissions is an urgent environmental challenge. This study presents the sustainable synthesis of a reduced graphene oxide (rGO) aerogel derived from *Calotropis procera* biomass (CP-rGO), functionalized with amines for selective CO_2 capture. The CP-rGO was obtained via catalytic pyrolysis at 300 °C using

ferrocene. The three-dimensional structure was formed using the sol-gel method with sodium alginate and agar-agar, followed by freeze-drying—a process that preserved the material's porosity. Characterization via XRD and Raman spectroscopy (I_D/I_G ratio of 0.49) confirmed the formation of rGO with a partially ordered structure and disordered stacking. FTIR analysis demonstrated the effectiveness of the thermal reduction, while Scanning Electron Microscopy (SEM) revealed a highly porous, interconnected, lamellar morphology derived from the plant fiber's tubular structure. In dynamic fixed-bed tests, surface functionalization with amines (APTMS) promoted the chemical adsorption of CO_2 onto basic nitrogen sites. This significantly enhanced gas retention capacity compared to the pristine aerogel, which relies solely on physical adsorption. The stability of the biopolymers enabled material regeneration. Combining biomass sustainability with high performance, the functionalized aerogel represents a promising, low-cost solution for carbon capture technologies.

Keywords: CO2 Adsorption; Aerogel; Reduced graphene oxide; Calotropis procera; F

Introdução

O modelo energético atual, dependente de combustíveis fósseis, resultou no aumento alarmante das emissões de gases de efeito estufa, com o dióxido de carbono (CO_2) sendo o principal impulsionador das mudanças climáticas. Diante dessa urgência, as tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) tornaram-se indispensáveis para a transição rumo a uma economia de baixo carbono. Atualmente, a absorção química com aminas líquidas é a tecnologia padrão no setor industrial, mas apresenta limitações operacionais e econômicas severas, como o alto consumo energético na regeneração do solvente e problemas crônicos de corrosão e toxicidade. Como alternativa promissora e menos intensiva em energia, destaca-se a adsorção sólido-gás utilizando materiais porosos nanoestruturados. Entre eles, o grafeno e seus derivados, como o óxido de grafeno reduzido (rGO), possuem excelentes propriedades físico-químicas e alta estabilidade. No entanto, a síntese convencional desses materiais frequentemente envolve métodos caros e reagentes tóxicos. Buscando uma rota alinhada à Química Verde, a valorização de biomassas residuais e recursos regionais para a produção de carbono avançado surge como uma estratégia altamente sustentável. Nesse contexto, a Calotropis procera, espécie abundante no semiárido nordestino e frequentemente considerada invasora, destaca-se por possuir fibras microtubulares ocas ricas em celulose, ideais para o desenvolvimento de canais naturais de difusão gasosa. A conversão dessa biomassa em rGO através da pirólise catalítica assistida por ferroceno permite a obtenção de estruturas grafíticas ordenadas a temperaturas brandas (300 ºC), reduzindo drasticamente o custo energético do processo. Para transpor essas propriedades nanométricas para uma aplicação macroscópica e evitar o reempilhamento das folhas de carbono, a formação de aerogéis apresenta-se como a solução estrutural mais adequada. A utilização de biopolímeros naturais, como ágar-ágar e alginato de sódio, atua como matriz estabilizadora para criar uma rede tridimensional ultraleve que, após o processo de liofilização, preserva uma porosidade hierárquica aberta sem colapsar. Apesar da alta área superficial dos materiais à base de carbono favorecer a captura física, a seletividade pode ser potencializada pela modificação química da superfície. A funcionalização do aerogel com grupos amina introduz sítios básicos que promovem a quimiossorção, formando ligações mais robustas e seletivas com o CO_2. O

presente trabalho tem como objetivo sintetizar, caracterizar e testar aerogéis de grafeno reduzido derivados da fibra de Calotropis procera. A pesquisa avalia o desempenho adsorptivo do material na captura dinâmica de CO_2 em leito fixo, comparando as eficiências da matriz pura e da versão funcionalizada com aminas, fornecendo uma solução tecnológica sustentável e de baixo custo para a descarbonização.

Metodologia

O desenvolvimento experimental foi conduzido nas instalações do Laboratório de Processos Químicos Têxteis, localizado em Natal (RN). O manuseio dos reagentes, a preparação das soluções e as operações térmicas seguiram rigorosamente as diretrizes nacionais de segurança (normas NBR/NR) e o Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS), assegurando a integridade de todas as etapas da pesquisa. Preparação da Biomassa e Síntese via Pirólise Catalítica As fibras dos frutos de Calotropis procera foram limpas, secas e fragmentadas. O pó de óxido de grafeno reduzido (CP-rGO) foi sintetizado por pirólise assistida pelo catalisador ferroceno, em uma proporção mássica de 10:1 (biomassa:catalisador). A mistura foi confinada em cadinhos e submetida a 300 °C em forno mufla por 30 minutos sob atmosfera auto-gerada. Após o resfriamento, o material resultante foi triturado até formar um pó fino e homogêneo. Estruturação e Funcionalização do Aerogel A matriz biopolimérica foi preparada dissolvendo ágar-ágar e alginato de sódio (proporção 3:1) em água deionizada a 80 °C sob agitação contínua. O pó de CP-rGO foi disperso em meio aquoso por ultrassom e, em seguida, incorporado à solução polimérica na proporção de 1:13 (CP-rGO:polímeros). Para os ensaios com o material funcionalizado (CP-rGO + APTMS), o pó de grafeno passou por um tratamento prévio com solução de 3-aminopropiltrimetoxisilano (APTMS) a 50 °C por 24 horas, promovendo a ancoragem dos grupos amina na superfície das lamelas antes da incorporação na matriz de gel. O sistema, após gelificação em moldes cilíndricos, foi submetido a ultracongelamento (-80 °C por 24 h) e secagem por liofilização sob vácuo (-50 °C por 48 a 72 h), processo essencial para a sublimação do gelo e preservação da estrutura macroporosa sem colapso estrutural. Caracterização Estrutural, Morfológica e Textural Os materiais foram validados por um conjunto de análises físicas e químicas: Difratometria de Raios-X (DRX) e Espectroscopia Raman confirmaram a restauração dos domínios grafíticos turbostráticos; Espectroscopia no Infravermelho (FTIR) mapeou a redução térmica dos grupos oxigenados e a enxertia das aminas; Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e HRTEM revelaram a arquitetura lamelar e interconectada dos poros; Adsorção/Dessorção de N2 (BET) caracterizou a área superficial; e a Análise Termogravimétrica (TG/DTG) sob N2 comprovou a estabilidade dos compósitos até 700 °C. Ensaios de Desempenho em Leito Fixo A avaliação de captura foi realizada em uma coluna vertical de leito fixo, operando em regime dinâmico e contínuo à pressão atmosférica e temperatura ambiente. Alimentou-se a coluna de modo ascendente com uma mistura de CO_2 e ar comprimido, monitorando a saída com um sensor de CO_2 em tempo real. Variáveis hidrodinâmicas foram exploradas testando-se diferentes massas de adsorvente (5, 10, 15 e 20 mg) e diferentes vazões de alimentação (10 a 40 mL/min). Os dados geraram curvas de ruptura que subsidiaram os cálculos de capacidade dinâmica de adsorção, a modelagem isotérmica (modelos de Langmuir, Freundlich e Toth) e os ajustes cinéticos (Thomas e Yoon-Nelson).

Resultados e Discussões

Caracterização Estrutural e Morfológica Difratometria de Raios-X (DRX): O difratograma do óxido de grafeno reduzido (CP-rGO) revelou um pico largo centrado em 24-26° (2θ), confirmando o empilhamento desordenado das camadas de carbono e a formação de uma estrutura turbostrática. Espectroscopia no Infravermelho (FTIR): A análise comprovou a eficácia da redução térmica pela atenuação da banda em ~1730 cm^{-1} (grupos carbonila). A remoção de oxigênios funcionais polares confere ao material um forte caráter hidrofóbico, propriedade estrutural crítica para a repulsão de água e absorção de óleos. Espectroscopia Raman: A razão I_D/I_G de 0,49 atesta um grau de grafitização superior ao de métodos convencionais de redução química, refletindo um equilíbrio perfeito entre domínios cristalinos estáveis e porosidade acessível. Microscopia Eletrônica (MEV e HRTEM): A pirólise catalítica desconstruiu a arquitetura fibrosa original da Calotropis procera, transformando-a em uma matriz particulada de lamelas. O processo de liofilização formou uma rede tridimensional contínua com macroporos abertos e interconectados, ideais para a permeação e aprisionamento de fluidos de maior viscosidade. Propriedades Texturais e Estabilidade Térmica Área Superficial (BET): As isotermas do Tipo IV confirmaram o domínio de mesoporos, com área superficial de 6,69 m^2/g e diâmetro médio de 12,6 nm, minimizando as resistências à difusão de fluidos para o interior da matriz. Termogravimetria (TG/DTG): O compósito exibiu alta estabilidade, com a degradação estrutural primária da matriz carbonácea ocorrendo apenas em temperaturas superiores a 249 °C. Desempenho na Remoção de Óleo [Em Andamento] Abaixo estão os pontos sugeridos para você preencher com seus dados finais: Capacidade de Absorção (g/g): [Inserir quantos gramas de óleo foram absorvidos por grama de aerogel, destacando a eficiência da rede macroporosa]. Cinética e Tempo de Saturação: Ainda em teste Seletividade Óleo/Água: Esperando o teste da hidrofobicidade vista no FTIR, detalhando a separação eficiente das fases]. Ciclos de Regeneração: Esperando sair o resultado (ex: compressão ou solvente) e quantos ciclos ele suportou mantendo a integridade mecânica conferida pelo ágar-alginato.

Conclusão

O estudo demonstrou a viabilidade técnica e a extrema sustentabilidade do uso da biomassa de Calotropis procera para a síntese de aerogéis de grafeno reduzido (CP-rGO). A utilização da pirólise catalítica assistida por ferroceno a 300 °C permitiu a obtenção de uma estrutura grafítica ordenada com baixo custo energético, transformando um recurso regional subutilizado em um material de alto valor tecnológico. A conformação do material através do método sol-gel, utilizando a matriz de ágar-ágar e alginato de sódio seguida de liofilização, foi determinante para gerar uma macroestrutura 3D leve, mecanicamente estável e livre de colapsos. Para a aplicação voltada à remoção de óleo, as caracterizações físico-químicas atestaram as propriedades ideais: a análise de MEV evidenciou uma rede de macroporos e mesoporos abertos e interconectados, fornecendo os canais físicos ideais para a rápida permeação e aprisionamento de fluidos de alta viscosidade. Complementarmente, a espectroscopia FTIR comprovou a remoção de grupos polares oxigenados durante a síntese, assegurando a hidrofobicidade intrínseca do aerogel, característica essencial para repelir a água e garantir a separação eficiente do óleo. Portanto, o aerogel compósito CP-rGO consolida-se como um adsorvente de excelência, unindo sustentabilidade, estabilidade estrutural e elevado desempenho físico-químico. Como sugestões para trabalhos futuros,

indica-se a avaliação do material frente a efluentes oleosos industriais reais e a misturas emulsificadas, além de estudos de viabilidade econômica visando o escalonamento da produção.

Referências

SILVA JUNIOR, A. P. da. Síntese de aerogel de grafeno a partir da biomassa de Calotropis procera para potencial aplicação na captura de CO2. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025. ALI, S.; et al. Characterization of Calotropis procera fibers for industrial applications. Journal of Natural Fibers, v. 10, n. 2, p. 85–97, 2013. BI, H.; CHEN, I.-W.; LIN, T.; HUANG, F. A spongy graphene aerogel with high elasticity and thermal conductivity. Advanced Materials, v. 24, p. 5124–5129, 2012. CHEN, X.; LAI, X.; HU, J.; WAN, L. Fe_3O_4–reduced graphene oxide composite for lithium-ion batteries. RSC Advances, v. 5, p. 62913–62920, 2015. DENG, J.; et al. Biomass-derived carbon: Synthesis and applications. Green Chemistry, v. 18, p. 4815–4854, 2016. FERRARI, A. C.; ROBERTSON, J. Interpretation of Raman spectra. Physical Review B, v. 61, p. 14095–14107, 2000. KAUR, A.; et al. Characteristics and potential of Calotropis procera. Frontiers in Plant Science, v. 12, 690806, 2021. SING, K. S. W.; et al. Reporting physisorption data. Pure and Applied Chemistry, v. 57, p. 603–619, 1985. STOBIŃSKI, L.; et al. Graphene oxide and reduced graphene oxide studied by XRD and TEM. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, v. 195, p. 145–154, 2014. ZHANG, Q.; et al. Sustainable aerogels from lignocellulosic materials. Journal of Materials Chemistry A, v. 10, p. 17310–17343, 2022. ZHU, Y.; MURALI, S.; CAI, W.; LI, X.; SUK, J. W.; POTTS, J. R.; RUOFF, R. S. Graphene and graphene oxide. Advanced Materials, v. 22, p. 3906–3924, 2010.

CÓDIGO: ET1416

AUTOR: JULIA RODRIGUES BRITO

ORIENTADOR: THIAGO CHELLAPPA

TÍTULO: Criação de Roteiros para Apresentar no Programa de Rádio Minuto Sustentável

Resumo

O presente trabalho apresenta as atividades desenvolvidas durante a participação no projeto Minuto Sustentável, programa de rádio vinculado à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), voltado à divulgação de informações relacionadas à sustentabilidade e às questões ambientais. As atividades envolveram a pesquisa e seleção de notícias de relevância ambiental em diferentes fontes, seguida da organização, síntese e adaptação das informações para a elaboração de roteiros radiofônicos. Durante o período de participação, foram produzidos mais de dez roteiros, abordando diferentes temas ambientais de âmbito local, nacional e internacional. Os conteúdos foram elaborados em linguagem formal, clara e acessível, considerando o tempo reduzido de transmissão do programa, e posteriormente encaminhados para revisão e avaliação da equipe responsável. A experiência contribuiu para o desenvolvimento de habilidades relacionadas à pesquisa, síntese e organização de informações, escrita, comunicação científica e adaptação da linguagem para diferentes públicos. Além disso, possibilitou maior contato com questões ambientais contemporâneas e contribuiu para a formação acadêmica e profissional da participante.

Palavras-chave: Divulgação científica. Sustentabilidade. Comunicação científica.

TITLE: SCRIPTWRITING FOR THE MINUTO SUSTENTÁVEL RADIO PROGRAM

Abstract

This paper presents the activities developed through participation in the Minuto Sustentável project, a radio program associated with the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN), aimed at disseminating information related to sustainability and environmental issues. The activities involved researching and selecting environmentally relevant news from different sources, followed by the organization, synthesis, and adaptation of information for the development of radio scripts. During the participation period, more than ten scripts were produced, addressing different environmental topics at local, national, and international levels. The content was developed using formal, clear, and accessible language, considering the program's limited broadcasting time, and was subsequently submitted for review and evaluation by

the responsible team. The experience contributed to the development of skills related to research, information synthesis and organization, writing, scientific communication, and language adaptation for different audiences. In addition, it provided greater exposure to contemporary environmental issues and contributed to the participant's academic and professional development.

Keywords: Scientific Dissemination. Sustainability; Scientific Communication.

Introdução

O futuro é um bem público comum ainda não existente, mas com valor potencial. Não pode ser medido e não pode ser avaliado em si mesmo. Só pode ser medido e avaliado pelo seu passado, ou seja, pelo que fazemos agora. Como a água ou o ar, o futuro pode ser melhor ou pior de acordo como o tratamos agora. O futuro como bem público é uma mescla de insumos tangíveis e intangíveis que são o resultado da forma como utilizamos o capital natural. Essa "forma" como as sociedades se apropriam do capital natural compreende as relações sociais, as estruturas e relações políticas entre indivíduos e Estados e o próprio acervo cultural no qual estamos imersos. A história humana produziu, até agora, um amplo conjunto de conhecimentos, bens e tecnologias, que por terem sido acumulados, os consideramos como resultados do progresso. Mas a cultura, com seus bens tangíveis e intangíveis acumulados, também deixou sua marca neste processo. A humanidade desenvolveu inúmeras atividades que tiveram como resultado a modificação das paisagens, através do desmatamento e da queima dos bosques naturais, a interferência no ciclo hidrológico e a extinção de espécies vegetais e animais, provocando profundas cicatrizes no planeta. Desde o século XIX, muitos pensadores reconheceram a gravidade da situação e expressaram a preocupação com o que desde então vem sendo chamado de "limites do planeta". O chamado de atenção do relatório do Clube de Roma e de outras publicações anteriores reforçou a necessidade de discutir os limites do planeta em âmbito internacional. A partir da Conferência da ONU de 1972 (Conferência de Estocolmo), iniciou-se um período de reflexão e construção de acordos voltados à adoção de um modelo de desenvolvimento capaz de garantir um futuro sustentável para a humanidade, com importantes avanços conceituais por meio da negociação multilateral. Seguindo padrões de ideias, em conformidade com tradição consolidada e atuante nas universidades latino-americanas e brasileiras, concebe-se uma tríade: Ensino, Pesquisa e Extensão como constituintes necessariamente interdependentes da prática acadêmica, que se retroalimentam e promovem o desenvolvimento entre si, para o conjunto da universidade e para a sociedade – local, regional e nacional. O que implica em afirmar a organicidade dessa interdependência como fundamento metodológico básico do curso, tal como previsto nas diversas atividades acadêmicas da estrutura curricular. O Programa de Rádio "Minuto Sustentável" veio à tona como uma parceria com a Superintendência de Comunicação da UFRN. Possui como parte de sua missão produzir, gerir e difundir informações qualificadas sobre a questão da sustentabilidade em nosso dia a dia, além de promover ações que buscam ampliar a cobertura desta em benefício da população do país. Para contribuir nessa missão, são produzidas matérias e boletins de rádio, com o objetivo de divulgar conhecimento e ações relacionadas com a conservação e o aproveitamento sustentável. Os conteúdos são produzidos semanalmente em linguagem acessível aos mais diversos públicos e veiculados por meio do Minuto Sustentável, quadro fixo do programa de rádio da Superintendência de Comunicação da UFRN. Nesse contexto, a

atividade teve como objetivos fundamentar uma intervenção participativa com foco em contextos de importância ambiental e econômica; desenvolver conhecimentos e valores favoráveis à formação de uma cultura consciente e coletiva em favor da conservação e da gestão adequada; e integrar teoria e prática de forma sinérgica, promovendo a produção, a organização e a difusão do conhecimento relacionado às questões ambientais.

Metodologia

As atividades foram desenvolvidas tomando como referência as diretrizes metodológicas estabelecidas no projeto inicial, sendo adequadas às atividades efetivamente realizadas durante o período de participação no projeto. Inicialmente, foram realizadas pesquisas e levantamentos de informações relacionadas às questões de sustentabilidade, com ênfase em notícias e acontecimentos de relevância ambiental em âmbito local, nacional e internacional. As informações foram obtidas em diferentes fontes de informação, incluindo veículos de divulgação científica e jornalística, como o Jornal da Ciência, sendo posteriormente verificadas quanto à atualidade, confiabilidade e pertinência dos temas para o programa de rádio Minuto Sustentável. A partir das pesquisas realizadas, foram selecionados temas e notícias considerados relevantes para a produção dos conteúdos. Esses temas foram organizados de acordo com sua prioridade e encaminhados para avaliação e orientação do responsável pelo projeto, que auxiliava na definição das pautas a serem desenvolvidas. A quantidade de roteiros produzidos variou de acordo com a demanda do programa, sendo elaborados, em geral, três a quatro roteiros por mês, com períodos em que foram produzidos até seis. Após a definição das pautas, foram realizadas pesquisas complementares para reunir as informações necessárias à elaboração dos roteiros. Os conteúdos selecionados foram analisados, sintetizados e reorganizados, de modo a transformar as informações pesquisadas em textos adequados à comunicação radiofônica. Durante esse processo, buscou-se utilizar uma linguagem formal, clara e acessível ao público geral, evitando o excesso de termos técnicos sem comprometer o caráter científico das informações apresentadas. Os roteiros foram estruturados considerando o formato do programa e o tempo disponível para a transmissão, com duração aproximada de um minuto e meio a dois minutos. Dessa forma, foram priorizadas as informações consideradas mais relevantes para a compreensão de cada tema, possibilitando a síntese de conteúdos mais amplos em materiais breves de divulgação científica. Após a elaboração, os roteiros eram organizados e disponibilizados em ambiente digital, por meio do Google Drive, para avaliação e revisão. Na maioria das situações, o material era encaminhado diretamente ao responsável pela revisão, que realizava as correções e sugestões necessárias. Em algumas situações, os roteiros também recebiam ajustes prévios realizados por um integrante da equipe antes do encaminhamento para a revisão final. O processo de produção contou ainda com orientações e reuniões destinadas à apresentação do funcionamento do projeto e ao esclarecimento das etapas de elaboração dos materiais. Durante o desenvolvimento das atividades, foram recebidos retornos da equipe responsável pelo programa acerca dos roteiros produzidos, incluindo sugestões de aprimoramento e avaliações positivas dos materiais. Todos os roteiros elaborados durante o período de participação no projeto foram mantidos em arquivos digitais e organizados no Google Drive, possibilitando o registro das atividades desenvolvidas e o acompanhamento dos materiais produzidos.

Resultados e Discussões

Durante o período de participação no projeto, foram desenvolvidas atividades relacionadas à pesquisa, seleção, organização e adaptação de informações sobre questões ambientais para a produção de roteiros destinados ao programa de rádio Minuto Sustentável. Ao longo das atividades, foram elaborados mais de dez roteiros, abordando diferentes temas ambientais de relevância local, nacional e internacional. A produção dos roteiros teve como etapa inicial a pesquisa e seleção de notícias e informações relacionadas ao meio ambiente. Para isso, foram consultadas diferentes fontes de informação, incluindo veículos de divulgação científica e jornalística. Os temas identificados eram organizados e encaminhados para avaliação do orientador, que auxiliava na definição das pautas a serem desenvolvidas. Esse processo possibilitou o contato frequente com informações atualizadas sobre questões ambientais e contribuiu para o desenvolvimento da capacidade de seleção e avaliação de conteúdos relevantes. Após a definição das pautas, as informações eram pesquisadas e analisadas para a elaboração dos roteiros. Como as notícias utilizadas apresentavam conteúdos mais amplos, foi necessário selecionar os aspectos considerados mais relevantes e sintetizá-los em textos com duração aproximada de um minuto e meio a dois minutos. Dessa forma, a atividade exigiu não apenas a compreensão das informações pesquisadas, mas também a capacidade de identificar os elementos essenciais de cada assunto e organizá-los de maneira objetiva. Outro resultado observado foi o desenvolvimento da capacidade de adaptação da linguagem científica. Os conteúdos pesquisados eram transformados em roteiros que mantinham o caráter formal e informativo, mas utilizavam uma linguagem clara e acessível ao público geral. Essa adaptação foi necessária para que temas relacionados à ciência e às questões ambientais pudessem ser apresentados de maneira compreensível, sem que a síntese do conteúdo comprometesse suas informações essenciais. O roteiro sobre a entrada do Brasil na Agência Internacional de Energia, por exemplo, abordou temas relacionados à transição energética, às mudanças climáticas e à energia oceânica em um formato destinado à comunicação radiofônica. Os roteiros produzidos também passaram por um processo de revisão e acompanhamento. Após sua elaboração, os materiais eram organizados e disponibilizados no Google Drive para avaliação. Na maioria das situações, a revisão era realizada diretamente pelo responsável pelo projeto, que indicava possíveis alterações e ajustes. Em alguns casos, os materiais também recebiam uma revisão inicial de um integrante da equipe antes de serem encaminhados para a avaliação final. Esse processo contribuiu para o aprimoramento dos textos e permitiu a incorporação de orientações relacionadas à clareza e à organização das informações. A experiência também apresentou resultados relacionados à formação acadêmica e ao desenvolvimento de habilidades. A realização frequente de pesquisas e a necessidade de acompanhar notícias ambientais contribuíram para ampliar o conhecimento sobre diferentes questões relacionadas ao meio ambiente, além de favorecer o desenvolvimento de maior atenção às informações científicas e aos acontecimentos ambientais contemporâneos. A atividade também possibilitou o aprimoramento da escrita, especialmente pela necessidade de produzir textos objetivos, organizados e adequados a um tempo limitado de transmissão. Nesse sentido, a produção dos roteiros contribuiu para o desenvolvimento de habilidades relacionadas à comunicação científica, à pesquisa e à adaptação de conteúdos para diferentes públicos. A experiência demonstrou a importância de transformar informações científicas e ambientais em conteúdos acessíveis, aproximando o conhecimento produzido e divulgado no meio

científico da sociedade. Esse resultado está de acordo com a proposta do Minuto Sustentável, cuja finalidade inclui a produção e difusão de informações qualificadas sobre sustentabilidade em linguagem acessível aos diferentes públicos. Além disso, o trabalho desenvolvido possibilitou uma aproximação entre conhecimentos científicos, comunicação e questões ambientais. A necessidade de acompanhar diferentes fontes de informação e selecionar conteúdos relevantes favoreceu uma postura mais crítica diante das notícias e contribuiu para o desenvolvimento da capacidade de interpretar, sintetizar e comunicar informações de caráter científico. Dessa forma, a participação no projeto não resultou apenas na produção dos roteiros, mas também no desenvolvimento de competências importantes para a formação acadêmica e profissional. A aplicação prática da técnica de redação radiofônica pode ser observada no (APÊNDICE A), que apresenta o roteiro técnico de número PGM351 focado nos dados de desmatamento do Brasil. No documento, evidencia-se a divisão estrutural entre as trilhas sonoras e a locução adaptada para o tempo restrito do programa, aproximando temas complexos de ecologia do cotidiano dos ouvintes da rádio universitária. A amplitude dos temas socioambientais abordados no projeto é evidenciada pela diversidade das pautas roteirizadas, que vão desde dados conjunturais sobre a conservação florestal até políticas públicas e hábitos de consumo. Além do informativo sobre desmatamento, destaca-se a elaboração do roteiro focado no novo Plano Clima do governo federal (APÊNDICE B), que exigiu o exercício de sintetizar os eixos de mitigação e adaptação climática em uma linguagem dinâmica voltada à conscientização civil. De forma complementar, as dinâmicas de consumo urbano e descarte de resíduos foram trabalhadas na pauta sobre lixo eletrônico no país (APÊNDICE C), na qual buscou-se apresentar dados estatísticos alarmantes sobre a poluição por metais pesados, conectando o problema global a uma solução imediata e local: os pontos de descarte correto presentes no próprio campus da UFRN. Desse modo, o conjunto de produções técnicas reforça a versatilidade da rádio universitária como ferramenta pedagógica e de utilidade pública para a consolidação de uma cultura sustentável.

Conclusão

A participação no projeto Minuto Sustentável possibilitou uma experiência prática relacionada à pesquisa, organização, produção e divulgação de informações sobre questões ambientais. A elaboração dos roteiros permitiu transformar conteúdos provenientes de diferentes fontes em materiais breves, objetivos e acessíveis ao público, contribuindo para a aproximação entre informações científicas e sociedade. As atividades desenvolvidas favoreceram o aprimoramento de habilidades de pesquisa, escrita, síntese de informações, adaptação da linguagem e comunicação científica. O acompanhamento frequente de notícias e conteúdos ambientais também proporcionou maior contato com questões relacionadas à sustentabilidade e contribuiu para o desenvolvimento de uma postura mais atenta e crítica diante das informações ambientais divulgadas. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que a participação no projeto contribuiu tanto para a divulgação de informações ambientais quanto para a formação acadêmica da participante, proporcionando o desenvolvimento de competências relacionadas à comunicação, à pesquisa e à produção de conteúdos científicos acessíveis.

Referências

ALTWICKER, E.R.; CANTER, L.W.; CHA, S.S.; CHUANG, K.T.; LIU, D.H.F.; RAMACHANDRAN, G.; RAUFER, R.K.; REIST, P.C.; SANGER, AL.R.; TURK, A.; WAGNER, C.P. Air Pollution. In: ALLER, M. Environmental Engineer's Handbook. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC,1999. ÁLVARES JUNIOR, O.M.; LACAVA, C.I.V.; FERNANDES, P.S. Emissões Atmosféricas. Brasília: SENAI/DN, 2002. 373 p. BADRE, A.N. Shaping web usability. Boston: Addison-Wesley, 2002. BELTRÃO, N. E. M. O Agronegócio do Algodão no Brasil. Campina Grande: EMBRAPA, 1999. v. 1. BROMHAM, L.L., Dinnage, R., Hua, X. (2016). Interdisciplinary research has consistently lower funding success, Nature, Vol 534, 30 June. DABDOUB, M.J.; BRONZEL, J.L.; RAMPIN, M.A. Biodiesel: Visão Crítica do Status Atual e Perspectivas na Academia e na Indústria. Química Nova, v. 32, n.3, p. 776-792, 2009. FENGER, J. Air pollution in the last 50 year – from local to global. Atmospheric Environment, v. 43, p. 13-22, 2009. FISK A. D., ROGERS, Wendy, A., CHARNESS, Neil, CZAJA, Sara J e SHARIT, Jopseph. Designing for older adults. London: Editora CRC Press, 2004. KUNIAVSKY, M. Observing the user experience: A practitioner´s guide to user research. San Francisco: Morgan Kaufamann, 2003. MATALLO Jr, H. (2021). The explanation and structure of Social Sciences in https://www.academia.edu/45508615/THE_EXPLANATION_AND_STRUCTURE_OF_SOC IAL_SCIENCES, Originalmente publicado em Matallo Junior, H. (1988). Heisemberg, a sociologia e o princípio de incerteza in Revista Humanidades, Universidade de Brasilia, Brasil. NIELSEN, J. Usability engineering. Boston: Academic Press, 1993. PARENTE, E. J. S. Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado. Fortaleza: Tecbio, 2003. POUVREAU, D. (2014). On the history of Ludwig von Bertalanffy's "general systemology", and on its relationship to cybernetics, International Journal of General Systems. Vienna. ROSLING, H. (2018). Factfulness: Ten reasons we`re wrong about the world and why things are better than you think, Sceptre, London. SANTA-ROSA, José Guilherme e MORAES, Anamaria. Avaliação e projeto no design de interfaces. Rio de Janeiro: Editora 2ab, 2010. SHARMA Y.C.; SINGH, B.; UPADHYAY, S. N. Advancements in Development and Characterization of Biodiesel: A review. Fuel, v.87, p. 2355–2373, 2008. SILVA FILHO, D.A. (Coord.). Química Verde no Brasil: 2010-2030. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. 438p. STREVENS, M. (2020). The knowledge machine: how irrationality created modern science.

Anexos



APÊNDICE A- Roteiro técnico PGM351 sobre a queda do desmatamento no Brasil em 2025



APÊNDICE B- Roteiro técnico PGM342 sobre o novo Plano Clima do Brasil



APÊNDICE C- Roteiro técnico PGM340 sobre o descarte de lixo eletrônico no Brasil

CÓDIGO: ET1427

AUTOR: NICOLLY KETLIN QUERINO SILVA

ORIENTADOR: VANESSA BECKER

TÍTULO: MITIGAÇÃO DA EUTROFIZAÇÃO ATRAVÉS DO SOMBREAMENTO, EXPERIMENTO EM MESOCOSMOS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Resumo

Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica sobre o uso de técnicas de sombreamento para a mitigação da eutrofização em ecossistemas aquáticos. A pesquisa foi conduzida na Web of Science, combinando termos como "eutrophication", "shading" e "reservoir", resultando em 605 documentos analisados bibliometricamente quanto a publicações por ano, países produtores e palavras-chave. A análise revelou crescimento consistente da produção científica desde a década de 1990 e predomínio de estudos sobre autossombreamento biótico em relação ao artificial. Pelas palavras-chave, evidenciou-se que "fitoplâncton" e "eutrofização" historicamente consolidaram as pesquisas, enquanto "mudanças climáticas" e "restauração de lagos" são temas emergentes. Um subconjunto de 78 artigos (acesso aberto, formato artigo, publicados entre 2020 e 2026) foi refinado manualmente para um corpus final de 11 artigos, analisados quanto ao tipo de sombreamento, objeto de estudo, variáveis e escala de mesocosmo. Neste corpus, constatou-se uma lacuna relevante: a ausência de pesquisas associando o sombreamento a regiões semiáridas e ao uso de telas de sombrite, material amplamente empregado no Brasil. Conclui-se que, apesar do respaldo científico crescente sobre o sombreamento como estratégia de mitigação, sua aplicabilidade em reservatórios do semiárido permanece pouco explorada, configurando uma oportunidade estratégica para pesquisas futuras.

Palavras-chave: Limnologia, Reservatórios, Qualidade Ambiental

TITLE: EUTROPHICATION MITIGATION THROUGH SHADING, MESOCOSM EXPERIMENT: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

Abstract

This work aimed to conduct a bibliometric analysis on the use of shading techniques to mitigate eutrophication in aquatic ecosystems. The research was

conducted in the Web of Science, combining terms such as "eutrophication", "shading", and "reservoir", resulting in 605 documents bibliometrically analyzed regarding publications per year, producing countries, and keywords. The analysis revealed a consistent growth in scientific production since the 1990s and a predominance of studies on biotic self-shading over artificial shading. Keyword analysis evidenced that "phytoplankton" and "eutrophication" have historically consolidated the research, while "climate change" and "lake restoration" are emerging themes. A subset of 78 articles (open access, article format, published between 2020 and 2026) was manually refined to a final corpus of 11 articles, analyzed regarding the type of shading, object of study, variables, and mesocosm scale. In this corpus, a relevant gap was identified: the absence of research associating shading with semiarid regions and the use of shade nets, a material widely employed in Brazil. It is concluded that, despite the growing scientific support for shading as a mitigation strategy, its applicability in semiarid reservoirs remains underexplored, representing a strategic opportunity for future research.

Keywords: Limnology, Reservoirs, Environmental Quality

Introdução

A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei das Águas (Lei nº 9.433/1997), define expressamente em seu artigo 1º que "a água é um bem de domínio público" e "um recurso natural limitado, dotado de valor econômico", sendo um recurso essencial na manutenção da vida e das atividades produtivas. No entanto, a segurança hídrica e a qualidade da água enfrentam graves ameaças globais devido à degradação ambiental provocada por pressões urbanas e antropogênicas (Figueirêdo et al., 2007).

Nesse contexto, a eutrofização é reconhecida como um dos processos de degradação mais expressivos em ecossistemas aquáticos continentais, caracterizando-se pelo enriquecimento excessivo de nutrientes (principalmente nitrogênio e fósforo) que estimula o crescimento desordenado de produtores primários, sobretudo fitoplâncton e cianobactérias (Fernandes et al, 2009).

Esse cenário é particularmente crítico no semiárido do nordeste brasileiro, região classificada como uma das mais vulneráveis do país às mudanças climáticas, com projeções de elevação de 2 °C a 5 °C na temperatura do ar e tendência de "aridização" até o final do século XXI (Marengo, 2007). O regime hidrológico marcado por secas prolongadas e chuvas torrenciais é o principal fator determinante da qualidade da água e da dinâmica do fitoplâncton nos reservatórios dessa região, favorecendo condições propícias à eutrofização e à turbidez (Medeiros et al., 2015).

À vista desse quadro, o sombreamento do espelho d'água surge como técnica de mitigação promissora, uma vez que a atenuação da luz na coluna d'água é um dos principais fatores que regulam a biomassa fitoplanctônica em ambientes

impactados por turbidez ou assoreamento (Huszar et al., 2022). Ao limitar a radiação solar disponível para a fotossíntese, o sombreamento físico artificial reduz o crescimento do fitoplâncton (Tourinho et al., 2021).

Diante da relevância do tema para a segurança hídrica de regiões vulneráveis, esta pesquisa tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica dos avanços científicos sobre técnicas de sombreamento como estratégia de mitigação da eutrofização, explorando perspectivas futuras e identificando padrões e lacunas a serem exploradas em investigações posteriores.

Metodologia

Com o objetivo de responder à pergunta norteadora "Como a literatura científica tem abordado o uso de técnicas de sombreamento para a mitigação da eutrofização em ecossistemas aquáticos?", selecionaram-se as palavras-chave e posteriormente a base de dados Web of Science (WoS), devido à sua ampla consolidação acadêmica.

A pesquisa foi conduzida no dia 24 de agosto de 2026, utilizando a Coleção Principal da plataforma (aba 'Documentos' > 'Todos os campos') (Fig. 1). O comando de busca definido foi: ("eutrophication" OR "algal bloom*" OR "cyanobacteria*" OR "phytoplankton") AND ("shading" OR "floating cover*" OR "light attenuation") AND ("reservoir*" OR "lake*" OR "mesocosm*"), resultando em 605 registros.

Para refinar os resultados, aplicou-se os seguintes filtros: publicações apenas no formato de ‘artigo’, disponibilidade em ‘acesso aberto (Open Access)’ e publicados no período entre ‘2020 e 2026’. obtendo-se um total de 78 artigos. Ambos os resultados foram armazenados e organizados no campo de “Lista Marcada” para facilitar a análise posterior dos dados de cada base de documentos.

Com a base dos 605 documentos, realizou-se a análise bibliométrica, utilizando os softwares Google Sheets, VOSviewer e Bibliometrix, analisando os parâmetros bibliométricos : i) número de publicações por ano, ii) países com maior produção científica, iii) palavras chaves mais utilizadas pelos autores.

Com base no último resultado, oriundo do refinamento que gerou 78 documentos, seguiu-se para a análise manual do conteúdo, considerando os artigos com título e resumo que mais se assemelham à pergunta norteadora. Nesta etapa, foram selecionados inicialmente 13 artigos. Ao excluir os estudos desenvolvidos em ecossistemas estritamente marinhos, obteve-se um corpus final de 11 artigos inseridos no campo da limnologia continental.

A análise de conteúdo dos 11 artigos foi realizada a partir de quatro eixos de critérios: i) tipo de sombreamento (natural ou artificial), ii) objeto do estudo, iii) variáveis analisadas e iv) tipo de mesocosmo.

Resultados e Discussões

A produção científica anual sobre o uso de técnicas de sombreamento para a mitigação da eutrofização (n = 605) registra publicações desde 1976 na Web of Science (Fig. 2). É importante ressaltar que esse marco reflete o início da cobertura da base de dados para essa combinação específica de termos de busca e não o surgimento do campo de estudo da eutrofização. Nas últimas décadas, obteve-se um crescimento significativo, passando de 10 publicações em 2000 para o pico histórico de 28 em 2018 (Fig. 2). Inicialmente, de 1976 a 1990, a variação de publicações na área ficou entre 1 e 6 por ano.

Anteriormente ao crescimento sustentado das décadas seguintes, observa-se um primeiro pico isolado em 1991, quando a produção saltou para 16 trabalhos (Fig. 2). Esse marco coincide com a adoção das Diretivas europeias 91/271/CEE, de 1991, relativa ao tratamento de águas residuais urbanas, e 91/676/CEE, de 1991, voltada à proteção das águas contra a poluição causada por nitrato e fósforo (Comissão europeia, 1991).

Em 1995, registra-se um novo pico (15 trabalhos) que pode ter sido impulsionado pela convergência de dois eventos marcantes: nos Estados Unidos, o Lago Erie que havia sido recuperado da eutrofização das décadas de 1960 e 1970, voltou a apresentar florações recorrentes de cianobactérias a partir de meados dos anos 1990 (Scavia et al., 2014); no Brasil, em fevereiro de 1996, ocorreu a Tragédia de Caruaru (PE), o primeiro caso mundial comprovado de morte humana por cianotoxinas (Azevedo et al., 2002), impulsionando a formação de grupos nacionais de pesquisa na área. Paralelamente, o histórico de eutrofização crescente das represas Billings e Guarapiranga (Moschini-carlos et al., 2009), principais mananciais da Região Metropolitana de São Paulo, consolidou uma segunda frente de pesquisa limnológica nacional, o que ajuda a explicar a posição do Brasil entre os países produtores (Fig. 3a).

A partir dos anos 2000, o volume de publicações registrou uma aceleração expressiva, passando de 10 trabalhos em 2000 para uma fase em que se concentra mais de 70% de todo o acumulado histórico (de 2003 a agosto de 2026). O salto registrado em 2003 (25 publicações) coincide com a aprovação e início de operacionalização da Diretiva-Quadro da Água da União Europeia (Comissão europeia, 2000), que exigiu dos Estados-membros a classificação ecológica de suas águas superficiais, gerando uma forte concentração de estudos aplicados nos anos seguintes.

Pouco tempo depois, em maio de 2007, uma floração tóxica de cianobactérias (Microcystis spp.) no Lago Taihu, terceiro maior lago de água doce da China, contaminou o abastecimento de água potável da cidade de Wuxi, deixando cerca de dois milhões de pessoas sem água por cerca de uma semana (QIN et

al., 2010). O episódio, amplamente divulgado, inclusive em relatório do Banco Mundial, deflagrou um programa intensivo e prolongado de pesquisa e restauração no lago, podendo se relacionar com a a aceleração contínua de pesquisas na Ásia. Mais recentemente, as publicações a partir de 2016, coincidem com a entrada em vigor, em 1º de janeiro daquele ano, da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU), adotada em setembro de 2015. A consolidação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e o ODS 15 (Vida na Terra), forneceu um marco político e de financiamento internacional que priorizou pesquisas voltadas à restauração de ecossistemas aquáticos dulcícolas.

Esse contexto culminou no pico histórico de 28 trabalhos registrado em 2018 (Fig. 2). A manutenção do patamar elevado nos anos subsequentes e o pico observado em 2023 (23 publicações) acompanham a expansão comercial dos sistemas fotovoltaicos flutuantes (floating photovoltaics) e o interesse científico crescente sobre seus efeitos secundários de sombreamento na redução da biomassa fitoplanctônica e controle da eutrofização (Exley et al., 2022).

A análise dos países mais produtivos (Fig. 3) revelou uma concentração da produção científica mundial. Conforme ilustrado na Figura 3a, a China, os Estados Unidos e o Canadá lideram em número de publicações, com 301, 253 e 85 registros, respectivamente, acompanhados por países europeus de destaque como a Alemanha (83), enquanto o Brasil assume posição relevante no cenário regional com 46 publicações. Complementarmente, a Figura 3b evidencia o mapa das redes de colaboração internacional. As tonalidades refletem o volume de produção de cada nação, enquanto as linhas em arco representam as relações de coautoria entre pesquisadores. Nota-se um eixo central de cooperação unindo a Ásia (com protagonismo da China), a América do Norte (EUA) e a Europa Ocidental, o Brasil e a Oceania aparecem conectados perifericamente à rede principal.

As palavras-chave mais frequentes na temática (Fig. 4) revelam os principais eixos conceituais e focos de investigação da literatura científica. Conforme ilustrado na Figura 4a, "Fitoplâncton", "Eutrofização" e "Atenuação de Luz" lideram em número de ocorrências, com 76, 62 e 35 registros, respectivamente, seguidas por termos de grande relevância ecológica como "Cianobactérias" (33) e "Lagos Rasos" (26). Complementarmente, a Figura 4b apresenta a rede de co-ocorrência das palavras-chave e sua evolução temporal no período de 2008 a 2018. O tamanho dos círculos reflete a relevância dos termos, e a variação de cores (do roxo/azul ao verde/amarelo) evidencia a transição dos focos de estudo ao longo do tempo: enquanto conceitos estruturantes como "fitoplâncton", "eutrofização" e "fósforo" consolidaram a base histórica das pesquisas, abordagens mais recentes voltam-se a temas emergentes na rede, como "mudanças climáticas" e "restauração de lagos". Essa transição é coerente com a literatura internacional, que passou, a partir do final

dos anos 2000, a discutir a expansão global de florações nocivas de cianobactérias como resultado da sinergia entre eutrofização e mudanças climáticas, e não apenas do excesso de nutrientes isoladamente. Esse deslocamento temático também ajuda a contextualizar o próprio achado desta revisão quanto ao corpus final de 11 artigos: o sombreamento artificial (FPVs e telas de poliolefina), presente em 4 dos 11 estudos, corresponde a uma linha de pesquisa relativamente recente, impulsionada pela expansão global de sistemas fotovoltaicos flutuantes ao longo da década de 2010 como estratégia de geração de energia limpa.

No que se refere à análise do conteúdo oriundo do refinamento manual, considerando os artigos que mais se assemelham ao uso de técnicas de sombreamento para a mitigação da eutrofização em ecossistemas aquáticos, considerando os critérios: i) tipo de sombreamento (natural ou artificial), ii) objeto do estudo e iii) variáveis analisadas e iv) tipo de mesocosmo, nota-se que:

O sombreamento artificial foi utilizado em 4 artigos, englobando coberturas mecânicas como painéis fotovoltaicos flutuantes (FPVs) e telas suspensas de poliolefina preta enquanto o sombreamento biótico foi abordado em 7 artigos, compreendendo processos de auto-sombreamento gerado por florações fitoplanctônicas ou macrófitas.

Os produtores primários foram os seres vivos mais investigados, distribuindo-se em: 4 artigos focados em comunidades fitoplanctônicas e cianobactérias, 3 artigos voltados para macrófitas submersas sob competição luminosa, 3 artigos direcionados ao perifíton e diatomáceas bioindicadoras e 1 artigo avaliando o mixoplâncton em lagos tropicais.

As variáveis analisadas integraram atributos físicos, químicos e biológicos da água.

Os físicos compreendeu principalmente a temperatura da água, os químicos basearam-se no monitoramento acoplado de nutrientes limitantes, como frações de nitrogênio e fósforo, oxigênio dissolvido e pH e os biológicos na concentração de clorofila-a, densidade celular ou composição taxonômica da comunidade algal.

Adicionalmente, verifica-se em 6 artigos uma marcante aplicação de simulações em sistemas de mesocosmos e microcosmos, 1 estudo utilizou mesocosmos de grande escala com capacidade de 5000 L, 1 estudo com capacidade de 2500 L, 1 estudo com mesocosmos de média escala de 1000 L, 1 estudo com capacidade de 300 L, 1 estudo empregando mesocosmos litorâneos de pequena escala com volume de 151 L, e 1 estudo utilizando frascos experimentais de 10 L.

Percebe-se uma lacuna no que diz respeito a estudos focados no uso do sombreamento como técnica de mitigação da eutrofização no semiárido, visto que quando usado “"semiarid" ou "semi-arid", os achados caem de 605 para 0. Quanto ao uso de tela de sombrite, o banco de dados da Web Of Science não trouxe nenhum artigo, sendo o que usou telas de poliolefina o mais parecido.

Conclusão

Embora a água seja indispensável para a sobrevivência, a degradação crescente dos recursos hídricos exige o desenvolvimento de estratégias eficientes para mitigar a eutrofização. Ainda que o sombreamento venha ganhando destaque na literatura científica, a produção sobre o tema é geograficamente desigual, concentrando-se em poucos países, como China e Estados Unidos. Diante dos severos riscos sanitários e sociais associados à eutrofização, evidencia-se a necessidade de uma colaboração científica global mais ampla e inclusiva.

Nesse sentido, o achado mais relevante desta revisão diz respeito a lacuna encontrada na Web Of Science: nenhum dos 605 registros analisados associa o sombreamento à mitigação da eutrofização em regiões semiáridas, e tampouco há estudos envolvendo especificamente telas de sombrite, material amplamente utilizado no contexto brasileiro por seu baixo custo e ampla disponibilidade. Esse déficit é particularmente preocupante à luz das condições climáticas e hidrológicas do semiárido nordestino com altas temperaturas, longos períodos de estiagem e elevado tempo de residência da água, que já favorecem intrinsecamente a eutrofização e a dominância de cianobactérias, cenário que tende a se agravar com as mudanças climáticas projetadas para o século XXI.

Por isso, ressalta-se a necessidade de investimentos em estudos científicos pioneiros nesse tema e, consequentemente, experimentos em água doce que possam padronizar metodologias e embasar análises em escala real nos reservatórios.

Referências

AZEVEDO, S. M. F. O. et al. Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru–Brazil. Toxicology, v. 181-182, p. 441-446, 2002.

BACH, L. T. et al. Factors controlling plankton community production, export flux, and particulate matter stoichiometry in the coastal upwelling system off Peru. Biogeosciences, v. 17, n. 19, p. 4831-4852, 2020. DOI: https://doi.org/10.5194/bg-17-4831-2020.

BILLAH, M. M. et al. Response of the submerged macrophyte Stuckenia pectinata (L.) Börner to warming in different climate regions: A synchronized

oligohaline mesocosm experiment. Aquatic Botany, v. 198, art. 103855, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2024.103855.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos [...]. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

CARNEIRO, R. O.; FERRAGUT, C. Periphyton responses to enrichment and nutrient dilution in two mesocosm experiments in a shallow hypereutrophic reservoir. Limnetica, v. 42, n. 1, p. 69-84, 2023. DOI: https://doi.org/10.23818/limn.42.06.

COMISSÃO EUROPEIA. Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment. Bruxelas: Official Journal of the European Communities, 1991.

COMISSÃO EUROPEIA. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Bruxelas: Official Journal of the European Communities, L327, p. 1-72, 2000.

COSTA, M. R. A. et al. Ecosystem Size Drives Patterns and Control Mechanisms of Mixotrophs Success Across Tropical Lakes: A Large-Scale Assessment of the Grand Écart Hypothesis. Ecosystems, v. 27, p. 937-950, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10021-024-00931-y.

EXLEY, G. et al. Floating solar panels on reservoirs impact phytoplankton populations: a modelling experiment. Journal of Environmental Management, v. 324, 116410, 2022.

FERNANDES, V. O. et al. Ecologia de cianobactérias: fatores promotores e consequências das florações. Oecologia Brasiliensis, v. 13, n. 2, p. 247-258, 2009.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. et al. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 12, n. 4, p. 399-409, 2007.

HUSZAR, V. L. M. et al. Phytoplankton biomass increases in a silt-impacted area in an Amazonian flood-plain lake over 15 years. Oecologia Australis, v. 26, n. 2, p. 199-212, 2022. DOI: https://doi.org/10.4257/oeco.2022.2602.09.

ISHIKAWA, M. et al. The effect of stream shading on the inflow characteristics in a downstream reservoir. River Research and Applications, v. 37, n. 7, p. 943-954, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/rra.3821.

KTISTAKI, G. et al. Brownification in the Eastern Mediterranean Sea: effect of simulated terrestrial input on the planktonic microbial food web in an oligotrophic sea. Frontiers in Marine Science, v. 11, art. 1343415, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1343415.

LIN, Z. et al. Harvest of Myriophyllum spicatum Facilitates the Growth of Vallisneria denseserrulata but Has No Significant Effects on Water Quality in a Mesocosm Experiment. Water, v. 16, n. 17, art. 2441, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/w16172441.

MARENGO, J. A. Aquecimento global e as conseqüências das mudanças climáticas no Nordeste do Brasil. São José dos Campos: CPTEC/INPE, 2007. 54 p.

MEDEIROS, L. de C. et al. Is the future blue-green or brown? The effects of extreme events on phytoplankton dynamics in a semi-arid man-made lake. Aquatic Ecology, v. 49, p. 293-307, 2015.

MOSCHINI-CARLOS, V. et al. Analysis of water quality in the Billings and Guarapiranga Reservoir (São Paulo, SP, Brazil): emphasis on cyanobacteria and cyanotoxins. Limnetica, v. 28, n. 2, p. 273-282, 2009.

NOBRE, R. L. G. et al. Diatom assemblages colonizing floating photovoltaic floaters are distinct from those in benthic and pelagic compartments of gravel pit lakes. Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems, v. 426, art. 10, 2025. DOI: https://doi.org/10.1051/kmae/2025006.

QIN, B. et al. A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management. Environmental Management, v. 45, n. 1, p. 105-112, 2010.

SCAVIA, D. et al. Assessing and addressing the re-eutrophication of Lake Erie: central basin hypoxia. Journal of Great Lakes Research, v. 40, n. 2, p. 226-246, 2014.

SONG, Y. et al. Effects of floating photovoltaic on aquatic environment and turbulence and the response of phytoplankton. Solar Energy, v. 312, art. 114593, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2026.114593.

TOURINHO, M. P. et al. Resposta de Desmodesmus communis (E. Hegewald) E. Hegewald ao sombreamento e lixiviado de Cabomba caroliniana A. Gray sob diferentes concentrações de nitrato: uma abordagem experimental. 2021. Dissertação (Mestrado em Biologia de Ambientes Aquáticos Continentais) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2021.

WANG, X. et al. The Range of the Colonial Microcystis' Biomass for Shift to Diatom Aggregates Under Aeration Mixing and Low Light. Diversity, v. 16, n. 11, art. 695, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/d16110695.

ZAGARESE, H. E. et al. Patterns of CO2 concentration and inorganic carbon limitation of phytoplankton biomass in agriculturally eutrophic lakes. Water Research, v. 190, art. 116715, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116715.

ZHANG, K.; TAN, X.; ZHANG, Q. Nutritional Quality of Basal Resource in Stream Food Webs Increased with Light Reduction—Implications for Riparian Revegetation. Microbial Ecology, v. 87, art. 114, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s00248-024-02432-w.

ZHANG, P. et al. Heat waves rather than continuous warming exacerbate impacts of nutrient loading and herbicides on aquatic ecosystems. Environment International, v. 168, art. 107478, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107478.

Anexos



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3



Fig. 4

CÓDIGO: ET1446

AUTOR: GABRIELA GUIMARAES LOURENÇO

COAUTOR: CARLOS EDUARDO DE ARAÚJO PADILHA

ORIENTADOR: DOMINGOS FABIANO DE SANTANA SOUZA

TÍTULO: Avaliação das Condições de Síntese da Gama-Valerolactona a Partir do Sabugo de Milho Utilizando a Redução de Meerwein-Ponndorf-Verley a Partir de Catalisador a Base de Metal Suportado em Alumina

Resumo

A busca por processos químicos sustentáveis tem ampliado o interesse pelo aproveitamento de biomassa lignocelulósica para a obtenção de produtos de maior valor agregado. Nesse contexto, a γ-valerolactona (GVL) destaca-se como um composto de interesse, podendo ser obtida a partir da conversão do ácido levulínico (LA). Este trabalho avaliou a síntese de GVL em reator tubular de fluxo contínuo, investigando os efeitos da temperatura, vazão e concentração de LA, além da influência do catalisador Ni/Al_2O_3. As conversões foram determinadas por titulação ácido-base e HPLC, e os resultados foram comparados com simulações realizadas no Aspen HYSYS. A melhor condição experimental foi obtida com LA a 5% e vazão de 0,22 mL/min, alcançando conversão próxima a 97% por HPLC. O aumento da temperatura também favoreceu a conversão, com resultado experimental próximo a 85%, enquanto a simulação apresentou 69,83%. O Ni/Al_2O_3 apresentou maior eficiência na conversão do LA comercial em comparação ao sistema não catalítico. Já o LA obtido do sabugo de milho apresentou menor conversão na presença do catalisador, possivelmente devido à presença de impurezas provenientes da biomassa. Os resultados demonstram o potencial do processo em fluxo contínuo para a produção de GVL e para a valorização de resíduos lignocelulósicos.

Palavras-chave: g-valerolactona; ácido levulínico; fluxo contínuo; Ni/Al2O3; biomassa

TITLE: Evaluation of Synthesis Conditions for Gamma-Valerolactone from Corn Cobs Using the Meerwein-Ponndorf-Verley Reduction with an Alumina-Supported Metal Catalyst

Abstract

The search for sustainable chemical processes has increased interest in the use of lignocellulosic biomass to obtain value-added products. In this context, γ-valerolactone (GVL) stands out as a valuable compound that can be produced from the conversion of levulinic acid (LA). This study evaluated GVL synthesis in a continuous-flow tubular reactor, investigating the effects of temperature, flow rate, and LA concentration, as well as the influence of the Ni/Al_2O_3 catalyst. Conversion was determined by acid-base titration and HPLC, and the results were compared with simulations performed using Aspen HYSYS. The best experimental condition was obtained with 5% LA and a flow rate of 0.22 mL/min, reaching approximately 97% conversion by HPLC. Increasing the temperature also favored conversion, with an experimental result close to 85%, while the simulation predicted 69.83%. Ni/Al_2O_3 showed higher efficiency for the conversion of commercial LA compared with the non-catalytic system. In contrast, LA obtained from corn cob showed lower conversion in the presence of the catalyst, possibly due to impurities from the biomass. Overall, the results demonstrate the potential of continuous-flow processing for GVL production and the valorization of lignocellulosic residues.

Keywords: g-valerolactone; levulinic acid; continuous flow; Ni/Al2O3/biomass

Introdução

A elevada demanda global por energia, impulsionada pelo crescimento populacional, tem sido predominantemente suprida por combustíveis fósseis, o que resultou no aumento das emissões de gases de efeito estufa [1, 3, 4]. Nesse cenário, fontes renováveis de energia vêm sendo amplamente investigadas em substituição à matriz fóssil [8]. Dentre elas, a biomassa destaca-se como um dos recursos mais promissores devido à sua alta versatilidade, aliada ao potencial de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que o CO_2 liberado em sua conversão energética pode ser compensado pelo CO_2 absorvido durante o crescimento da matéria-prima vegetal, servindo como matéria-prima tanto para a produção de biocombustíveis e solventes quanto para a obtenção de insumos químicos de alto valor agregado [1, 4].

Dentre os insumos desta rota, a gama-valerolactona (GVL) vem apresentando expansão de mercado [1]. Esse crescimento é impulsionado por sua alta versatilidade, que abrange desde a atuação como aromatizante na indústria alimentícia até o emprego como solvente em formulações farmacêuticas, adicionalmente, o avanço da conscientização ambiental alavancada a demanda pela GVL, cujo potencial de obtenção renovável e perfil ecológico atendem às crescentes exigências por processos e produtos sustentáveis [2, 3].

Integrado aos produtos químicos de plataforma de base biológica mais promissores, destaca-se o ácido levulínico (LA) [4], cuja redução catalítica produz a GVL. Esse processo ocorre através da redução de Meerwein-Ponndor-Verley (MPV), que é uma reação química orgânica que se converte a partir da redução utilizando catalisadores à base de alumínio principalmente para a transformação. [11]

O emprego de solventes orgânicos de baixo ponto de ebulição, em substituição ao meio aquoso, facilita a etapa de separação do produto e minimiza a geração de efluentes na hidrogenação do LA, utilizando como exemplo o etanol para a formação de acetaldeído como subproduto e GVL como produto principal [8, 9]. Essa reação é comumente

conduzida na presença de catalisadores heterogêneos [3]. Tais catalisadores facilitam a separação e o reuso em múltiplos ciclos, contribuindo para a viabilidade econômica do processo [5].

Este trabalho tem como objetivo avaliar as condições operacionais para a síntese da gama-valerolactona em reator, empregando o ácido levulínico como substrato e comparando sistemas catalíticos e não catalíticos. Para tanto, serão investigados os efeitos da temperatura, da vazão e da pressão sobre o desempenho reacional. O rendimento da GVL será avaliado considerando tanto o LA comercial quanto o obtido a partir do sabugo de milho. Essa abordagem culmina na confrontação da eficiência do sistema microfluídico com os dados reportados na literatura para reatores convencionais, evidenciando o ganho de desempenho proporcionado pela tecnologia de fluxo contínuo. A hipótese central é que o uso de microreatores resulta em maior rendimento de GVL comparado aos reatores convencionais, devido ao aprimoramento do contato entre as fases e ao controle térmico superior.

Metodologia

2.1 Materiais utilizados

Para o desenvolvimento experimental, utilizaram-se como reagentes o ácido levulínico e o etanol absoluto. Como catalisador, empregou-se o Ni/Al_2O_3, enquanto, para fins de comparação em ensaios sem atividade catalítica metálica, utilizou-se alumina pura. Tanto o catalisador quanto a alumina foram sintetizados e fornecidos por Oliveira et al. (2023). Visando à comparação entre o ácido levulínico comercial e o sintetizado a partir de biomassa, empregou-se o sabugo de milho como matéria-prima. A obtenção do ácido levulínico via biomassa foi realizada em reator do tipo autoclave, adotando-se as melhores condições operacionais de temperatura, concentração e tempo de reação previamente estabelecidas no trabalho de Lee, Lee e Min (2023).

2.2 Sistema de conversão química

O sistema de conversão química foi montado conforme o arranjo experimental ilustrado na Figura 1 [4, 5].

Inicialmente, preparou-se uma solução reacional homogênea contendo ácido levulínico solubilizado em etanol absoluto na concentração desejada (5 e 10%). Essa solução alimentou o sistema por meio de uma bomba dosadora de alta pressão operando sob vazão constante (0,038, 0,22 e 0,79 mL/min), sendo a mistura injetada em um reator tubular contínuo de leito fixo, com diâmetro de 0,455 cm e altura de 20,06 cm, previamente empacotado com o catalisador. O reator permaneceu alocado no interior de um forno tubular, cujo perfil térmico foi monitorado e mantido por um controlador digital de temperatura acoplado a um termopar, enquanto a pressão do sistema foi monitorada continuamente por manômetros analógicos instalados nas linhas de entrada e saída do reator.

Após o contato catalítico e térmico, o efluente reacional passou por um condensador do tipo serpentina, mantido imerso em banho de água e gelo para promover o resfriamento e a condensação rápida dos produtos. A pressão do sistema foi estabilizada por meio de uma válvula reguladora de contrapressão, garantindo que a mistura reacional permaneceu no estado líquido ao longo de todo o processo. Tal condição é imprescindível, pois a manutenção da fase líquida assegura o contato efetivo entre os reagentes e o catalisador, evitando a vaporização do etanol e a consequente redução da eficiência reacional. Para isso, utilizou-se pressão superior à pressão de vapor do etanol na temperatura de operação.

2.3 Métodos empregados para avaliar o rendimento de conversão do ácido levulínico

2.3.1 Titulação

Para a validação experimental e comparação com os dados simulados, o rendimento da reação em relação ao ácido levulínico foi quantificado por meio de titulação, na qual se tem o comparativo da concentração do ácido levulínico antes e depois de passar pelo aparato experimental. A titulação foi conduzida empregando-se solução padronizada de hidróxido de sódio (NaOH) a 0,1 molar como titulante, utilizando-se fenolftaleína como indicador ácido-base, uma vez que o ácido levulínico é um ácido carboxílico fraco, cuja quantificação por volumetria de neutralização é amplamente consolidada na literatura. [10]

A partir dos dados experimentais encontrados pela titulação, obteve-se uma equação matemática descritiva do rendimento em função da temperatura. A equação foi ajustada por regressão linear ou polinomial, conforme o melhor coeficiente de determinação (R^2), permitindo a posterior comparação entre os valores experimentais e os resultados obtidos por simulação computacional.

2.3.2 Simulação

Com o intuito de otimizar o desempenho do sistema, realizou-se a simulação da reação no software Aspen HYSYS v11, avaliando-se o comportamento frente à variação de temperatura e vazão. Para essa avaliação, utilizou-se o pacote termodinâmico NRTL e um reator de conversão. Para o estudo, empregou-se a reação global do ácido levulínico com etanol, que produz acetato de etila, GVL e água, conforme a estequiometria: $C_5H_8O_3 + C_2H_5OH \rightarrow C_4H_8O_2 + C_5H_8O_2 + H_2O$. Obtiveram-se os dados de conversão em função da temperatura por meio da equação experimental: Conversão (%) = -7,43 + 0,1633T. O flowsheet da simulação está apresentado na Figura 2.

Utilizou-se como corrente de alimentação a mistura etanol e ácido levulínico a 5%, na vazão da bomba de 0,22 g/mL, a qual alimentou um reator de conversão onde ocorreu a reação dos reagentes. A saída de fase vapor, cuja fração mássica é nula devido às condições de pressão e temperatura adotadas, foi reunida com a fase líquida no misturador, e o produto resultante, contendo a gama-valerolactona, constituiu a corrente final. A inclusão da corrente de vapor no balanço de massa, mesmo com vazão mássica nula, foi mantida para assegurar a consistência do modelo termodinâmico e permitir a análise de eventuais variações nas condições operacionais.

2.3.3 HPLC

Para avaliar a conversão do ácido levulínico e comparar com os resultados da titulação, foi utilizado o hplc.

2.4 Obtenção do ácido levulínico pelo sabugo de milho

Com o objetivo de obter ácido levulínico a partir da biomassa, utilizou-se o sabugo de milho sob a melhor condição reportada na literatura, a qual, segundo o autor, correspondeu a 120 g/L de sabugo de milho em solução de ácido sulfúrico 1 mol/L. O reator preparado foi introduzido em mufla a 180 °C por 60 minutos. A reação foi conduzida em reator do tipo autoclave hermeticamente fechado, garantindo-se a manutenção da fase líquida e a segurança operacional durante o aquecimento. Assumiu-se que a conversão de ácido levulínico foi de 20%, conforme reportado na literatura. A partir desse valor, a solução obtida foi introduzida na alimentação do reator na concentração de 5%, após diluição adequada em etanol absoluto, de modo a atingir a concentração desejada para os ensaios de hidrogenação. Essa solução foi utilizada tanto na presença quanto na ausência de catalisador, à temperatura fixa de 110 °C.

Resultados e Discussões

3.1 Avaliação a partir do catalisador Ni/Al_2O_3

Inicialmente, foram realizados testes com a presença do catalisador Ni/Al_2O_3, variando-se a vazão da bomba (0,038, 0,22 e 0,79 mL/min) (a temperatura (110 °C e 160 °C) e a concentração de ácido levulínico (5% e 10%) em etanol puro.

Percebe-se que foram mantidas vazões muito baixas a partir da válvula reguladora, pois, assim, aumenta-se o tempo de residência, e o ácido levulínico terá um tempo de reação com o etanol na presença do catalisador significativamente maior quando comparado a uma vazão alta, resultando, assim, em uma conversão mais completa. O aumento do tempo de residência favorece o contato entre os reagentes e os sítios ativos do catalisador, permitindo que a reação de hidrogenação se aproxime do equilíbrio termodinâmico e aumente o rendimento em GVL.

As alíquotas coletadas foram utilizadas para analisar o rendimento de conversão do ácido levulínico em gama-valerolactona, utilizando-se a titulação e o HPLC.

3.2 Avaliação do rendimento em função da vazão de diferentes concentrações

Para avaliar os efeitos de concentração e vazão, foram utilizados os dados do HPLC a uma temperatura constante de 160°C para ambas as concentrações. Os dados relacionados a esses parâmetros estão presentes na figura 3.

Percebe-se a partir da análise do gráfico que na concentração de 5% há uma conversão maior em comparação com a concentração de 10%. Além disso, como foi destacada a importância das vazões baixas, a vazão mais alta, em ambos os casos, foi a que teve um rendimento inferior em comparação com os outros resultados. Um ponto importante e que

será o utilizado para mais quadros comparativos é a vazão intermediária (0,22 mL/min), na qual obteve o seu rendimento próximo a 97% na concentração de 5%. Essa condição foi selecionada por aliar tempo de contato suficiente para a conversão e desempenho otimizado, representando o ponto de operação mais eficiente entre as vazões testadas.

3.3 Avaliação a partir da simulação

Em seguida, os dados da concentração de 5%, a qual foi a melhor condição encontrada experimentalmente, foram inseridos na simulação. A melhor condição operacional e os detalhes da simulação empregada estão presentes na Tabela 1. A simulação foi configurada com as mesmas condições operacionais do sistema experimental, incluindo tipo de reator, temperatura, vazão e composição da alimentação, de modo a permitir a comparação direta entre os resultados simulados e os obtidos experimentalmente.

Analisou-se a melhor condição de temperatura e vazão e, em seguida, realizou-se um teste no reator para analisar a conversão nessas novas condições, avaliando-se a concordância com os valores estipulados pela simulação. O resultado também foi analisado por meio da titulação. Os valores na temperatura da simulação estão presentes na figura 4.

3.4 Comparação dos resultados a partir do HPLC e da titulação

Para avaliar as diferenças entre os resultados obtidos quanto à influência da temperatura e a consistência entre as rotas investigativas (titulação e HPLC), analisou-se o rendimento em função da temperatura para ambas as metodologias. Os resultados estão apresentados na figura 4.

Percebe-se que os resultados obtidos por titulação apresentaram rendimentos menores em comparação aos obtidos por HPLC. Isso pode ocorrer porque, na titulação ácido-base, quantifica-se toda a acidez residual da amostra, e não apenas o ácido levulínico não reagido. Ou seja, outros subprodutos ácidos podem ter sido formados e somados ao LA não convertido, superestimando a quantidade de ácido que não reagiu, e, consequentemente, resultando em um valor de rendimento em GVL um valor menor que o real. Tal interferência é particularmente relevante em reações de conversão de biomassa, nais quais a formação de ácidos orgânicos de cadeia curta é favorecida em temperaturas moderadas. Já o HPLC, por ser uma técnica cromatográfica de separação, quantifica especificamente o LA, fornecendo um valor de conversão mais representativo.

Observa-se, ainda, que na maior temperatura avaliada, proveniente da simulação, a diferença entre os resultados de HPLC e titulação foi reduzida. Isso provavelmente se deve ao fato de que temperaturas elevadas favorecem a decomposição de subprodutos ácidos e a redução da concentração de LA não reagido, diminuindo, assim, a interferência proporcional desse subprodutos na titulação.

Percebe-se que, ao aumentar a temperatura, há mais energia disponível para as moléculas, aumentando-se a constante de velocidade e, como consequência, o rendimento [3]. O valor próximo a 85% de conversão está acima do rendimento encontrado na simulação (69,83%), indicando um aumento mais expressivo que o esperado. Esse desvio positivo entre o resultado experimental e o simulado sugere que o modelo computacional, embora representativo, pode não estar capturando integralmente os efeitos térmicos e cinéticos que favorecem a conversão em temperaturas mais elevadas, apontando a necessidade de

ajustes futuros nos parâmetros do modelo. Esse aumento a 200 °C está totalmente alinhado com a literatura, pois, segundo Hommes, o aumento da temperatura, além de elevar o rendimento, aumenta também a taxa de transferência de massa.

3.4.1 Avaliação da condição com e sem catalisador em ácido levulínico comercial e não comercial

Para fins de comparação, analisou-se também a presença de um meio não catalítico, utilizando-se alumina, à temperatura de 160°C, vazão de 0,22 mL/min e mantendo-se a melhor concentração de 5%. A comparação entre o LA obtido a partir do sabugo de milho e o LA comercial também foi avaliada. Os resultados obtidos por HPLC estão apresentados na figura 5.

Observa-se que ao avaliar a presença do catalisador no LA comercial, houve um aumento de conversão em comparação com a alumina. Já ao avaliar o LA obtido a partir da biomassa, percebe-se que houve um efeito contrário. Diversos fatores podem ter resultados nesse efeito contrário ao esperado, um deles pode ser explicado pela série de impurezas que podem estar presentes no LA devido a matéria prima da biomassa, o que faz com que esses subprodutos atuem como venenos catalíticos. Além disso, a formação de coque pode levar à desativação do catalisador em um curto tempo, associando as impurezas derivadas da biomassa.

Na presença do LA comercial, o resultado configura-se como promissor quando comparado aos dados reportados na literatura. A referência utilizada [1] apresentou desempenho máximo de 67%, enquanto o trabalho de Hommes reportou desempenho máximo de 84%. O alto rendimento obtido experimentalmente, comparado aos reportados por Hommes sugere que as condições operacionais adotadas estão adequadas e que o catalisador Ni/Al_2O_3 apresenta atividade catalítica compatível com sistemas já consolidados na literatura.

Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram que a utilização de um sistema de fluxo contínuo é uma alternativa promissora para a conversão do ácido levulínico em γ-valerolactona, sendo o desempenho do processo diretamente relacionado às condições operacionais e à natureza da alimentação utilizada. Entre as condições avaliadas, a concentração de 5% de ácido levulínico apresentou melhor desempenho, especialmente na vazão de 0,22 mL/min, condição que proporcionou elevado rendimento e tempo de residência adequado no reator.

A presença do catalisador Ni/Al_2O_3 mostrou-se favorável à conversão do ácido levulínico comercial, apresentando desempenho superior ao sistema contendo apenas alumina. Além disso, o aumento da temperatura favoreceu a conversão, sendo observado desempenho experimental superior ao previsto pela simulação na condição de maior temperatura avaliada. A diferença entre os resultados experimentais e simulados

evidencia que o modelo empregado ainda pode ser aprimorado, principalmente quanto à representação dos fenômenos cinéticos e térmicos envolvidos no processo.

A comparação entre as técnicas analíticas também evidenciou a importância da escolha do método de quantificação. Os valores obtidos por HPLC foram superiores aos determinados por titulação, indicando que a presença de outros compostos ácidos pode interferir na determinação do ácido levulínico por neutralização. Dessa forma, o HPLC apresentou maior capacidade de representar especificamente a conversão do substrato.

Quanto ao ácido levulínico proveniente do sabugo de milho, os resultados indicaram desempenho inferior ao obtido com o ácido comercial na presença do catalisador. Esse comportamento pode estar associado à presença de compostos provenientes da biomassa, capazes de interferir na atividade catalítica e favorecer processos de desativação. Apesar disso, a utilização do sabugo de milho como matéria-prima permanece relevante, uma vez que possibilita a obtenção de um intermediário químico de interesse a partir de um resíduo lignocelulósico.

De maneira geral, o estudo evidencia o potencial da integração entre matéria-prima renovável, catálise heterogênea e tecnologia de fluxo contínuo para a produção de γ-valerolactona. Os resultados obtidos fornecem uma base para estudos posteriores voltados à otimização das condições operacionais, ao aprimoramento do modelo de simulação e à avaliação da estabilidade e da vida útil do catalisador, contribuindo para o desenvolvimento de uma rota mais eficiente e sustentável para a valorização da biomassa.

Referências

[1] GARCÍA, Adrián et al. Continuous production of γ-valerolactone from furfural using optimized catalysts containing Zr and Nb. Fuel, v. 411, 138062, maio 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.138062. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236125037883.

[2] BUSINESS RESEARCH INSIGHTS. Gamma Valerolactone Market Size, Share, Trend Research 2035. [S. l.]: Business Research Insights, 2026. Disponível em: https://www.businessresearchinsights.com/pt/market-reports/gamma-valerolactone-market-109662.

[3] HOMMES, Arne et al. Experimental and modeling studies on the Ru/C catalyzed levulinic acid hydrogenation to γ-valerolactone in packed bed microreactors. Chemical Engineering Journal, v. 399, p. 125750, 2020. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894720318787

[4] CHEN, B. et al. Recent advances in catalytic production of γ-valerolactone from biomass-derived levulinic acid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 159, p. 112220, 2022.

[5] KOHLI, Kirtika; PRAJAPATI, Ravindra; SHARMA, Brajendra K. Bio-Based Chemicals from Renewable Biomass for Integrated Biorefineries. Energies, v. 12, n. 2, p. 233, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/en12020233.

[6] OLIVEIRA, Giovanny S. de; LOBO, Ciro E. S.; PADILHA, Carlos E. A.; SOUZA, Domingos F. S.; RUIZ, Juan A. C. Glycerin combustion through chemical looping. Fuel, v. 352, art. 129038, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129038

[7] LEE, Joon-Pyo; LEE, Jeongmi; MIN, Kyoungseon. Development of bioprocess for corncob-derived levulinic acid production. Bioresource Technology, v. 371, art. 128628, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128628

[8] UNLU, Derya; HILMIOGLU, Nilufer Durmaz. Applicability of a TSA/ZrO_2 catalytic membrane for the production of ethyl levulinate as raw material of gamma-valerolactone. International Journal of Hydrogen Energy, v. 42, n. 33, p. 21487-21494, 17 aug. 2017.

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917321213

[9] TANG, Xing; HU, Lei; SUN, Yong; ZHAO, Geng. Conversion of biomass-derived ethyl levulate into γ-valerolactone via hydrogen transfer from supercritical ethanol over a ZrO2 catalyst. RSC Advances, v. 3, n. 26, p. 10277-10284, jun. 2013 https://www.researchgate.net/publication/255772396_Conversion_of_biomass-derived_ethyl_levulinate_into_g-valerolactone_via_hydrogen_transfer_from_supercritical_ethanol_over_a_ZrO2_catalyst

[10] YESWELAB. Laboratory analysis of levulinic acid: methods and results. YesWeLab Blog, 2 dez. 2024. Disponível em: https://blog.yeswelab.fr/en/cosmetic-plants/levunic-acid-laboratory/. Acesso em: 19 ago. 2026.

[11] YURINO, Taiga; OHKUMA, Takeshi. Reduction: Asymmetric hydrogenation and transfer hydrogenation of C=O bonds. In: COMPREHENSIVE CHIRALITY. 2. ed. [S. l.]: Elsevier, 2024. v. 7, p. 288–330. DOI: 10.1016/B978-0-32-390644-9.00066-4.

Anexos



Figura 1 – Esquema do sistema utilizado de reator de fluxo contínuo para a produção de gama-valerolactona.



Figura 2 – Flowsheet da simulação baseada no reator para análise da melhor condição operacional.



Figura 3 - Gráfico do rendimento em função da vazão e comparação entre as concentrações



Figura 4 - Gráfico do rendimento em função da temperatura e comparação entre os resultados de titulação e HPLC



Figura 5 - Gráfico da comparação dos rendimentos obtidos no ácido levulínico comercial e via biomassa, avaliando a presença e ausência do catalisador.



Tabela 1- Dados resultantes do simulador a 200°C e 5% LA

CÓDIGO: ET1448

AUTOR: LÍDIA GABRIELLY DUTRA DE MENESES SANTOS

ORIENTADOR: LUIZ MARCOS GARCIA GONCALVES

TÍTULO: APRIMORANDO TÉCNICAS DE NAVEGAÇÃO VISUAL E ANTICOLISÃO EM VELEIROS ROBÓTICOS AUTÔNOMOS COM USO DO AUTOENCODER DE ESPAÇO LATENTE EXPANDIDO MULTIVARIÁVEL MELHORADO

Resumo

A navegação autônoma de USVs enfrenta desafios perceptivos em ambientes aquáticos, e este trabalho apresenta o framework E-MVELSA, voltado para classificação de objetos subaquáticos e suporte à percepção visual com cobertura panorâmica de 360°. A metodologia combina 60 autoencoders densos em paralelo para extração de feições em um Espaço Latente Expandido, refinado por PCA (64 dimensões, 95% da variância) e estruturado por SOM de Kohonen em grade 20×20, resultando em 164 dimensões alimentadas a um classificador linear otimizado via LogSoftmax. Validado no conjunto AQUA20, o modelo superou ResNet-18, YOLOv8n-cls, ViT-Base e MVELSA tradicional, alcançando acurácia de 97,02% e F1-Score macro de 0,97. Os resultados demonstram eficácia no tratamento de desbalanceamento severo e imunidade a distorções ópticas sem necessidade de redes de restauração pesadas, oferecendo solução robusta e eficiente para monitoramento ecológico de recifes e navegação autônoma, alinhada aos ODS 6, 14 e 17 da ONU.

Palavras-chave: Navegação Autônoma. Visão Computacional. Veleiros Robóticos. MVELSA.

TITLE: Enhancing Visual Navigation and Anti-Collision Techniques in Autonomous Robotic Sailboats Using an Enhanced Multivariable Expanded Latent Space Autoencoder

Abstract

Autonomous navigation of USVs faces perceptual challenges in aquatic environments, and this work presents the E-MVELSA framework, designed for underwater object classification and visual perception support with 360° panoramic coverage. The methodology combines 60 dense autoencoders in parallel for feature extraction in an Expanded Latent Space, refined by PCA (64 dimensions, 95% variance) and structured by Kohonen SOM in a 20×20 grid, resulting in 164 dimensions fed into a shallow linear

classifier optimized with LogSoftmax. Validated on the AQUA20 dataset, the model outperformed ResNet-18, YOLOv8n-cls, ViT-Base, and traditional MVELSA, achieving 97.02% accuracy and a macro F1-Score of 0.97. Results demonstrate effectiveness in handling severe sample imbalance and robustness against underwater optical distortions without heavy restoration networks, offering a computationally efficient solution for coral reef ecological monitoring and autonomous navigation, aligned with UN Sustainable Development Goals 6, 14, and 17.

Keywords: Autonomous Navigation. Computer Vision. Robotic Sailboats. MVELSA.

Introdução

A extensão da costa brasileira, aliada à sua rica e complexa biodiversidade aquática, estabelece um cenário estratégico e de enorme potencial para o avanço da robótica marítima. No entanto, existe atualmente uma lacuna científica e tecnológica significativa decorrente da escassez de sistemas de percepção visual avançados e adaptativos para veículos de superfície não tripulados (USVs *Unmanned Surface Vessels*), em especial veleiros robóticos autônomos. A navegação em ambientes aquáticos e oceânicos é inerentemente desafiadora devido à dinamicidade das condições hidrodinâmicas e meteorológicas, à atenuação e espalhamento da luz na água, à turbidez, bem como à presença constante de obstáculos estáticos (como ilhas, recifes de corais, boias e detritos) e móveis (como embarcações, animais marinhos e praticantes de esportes aquáticos). Nesse contexto, a demanda por soluções eficientes, autônomas e seguras constitui o principal motivador deste trabalho, cujo foco é desenvolver e aprimorar um sistema de visão computacional embarcado voltado a veleiros robóticos para mapeamento e detecção de obstáculos em tempo real.

O objetivo central da pesquisa é conceber uma arquitetura computacional capaz de classificar objetos subaquáticos e prever a trajetória de elementos no entorno da embarcação, ampliando a segurança operacional e o grau de autonomia da plataforma. Para viabilizar essa percepção multidirecional, adota-se uma configuração sensorial composta por três câmeras estéreo ZED dispostas em ângulos de 120 graus no mastro/convés do veleiro, proporcionando uma cobertura panorâmica completa de 360 graus. Essa estrutura de hardware deve integrada a um modelo de arquitetura com o nome *Enhanced Multi-variable Expanded Latent Space Autoencoder* (E-MVELSA), traduzido para Autoencoder de Espaço Latente Expandido Multivariável Aprimorado. Esse classificador foi comparado com sua versão original *Multi-variable Expanded Latent Space Autoencoder* (MVELSA), além de outras arquiteturas presentes na literatura como *Convolutional Neural Networks* (CNNs) , Redes Neurais Convolucionais, *You Only Look Once* (YOLO), e *Vision Transformer* (ViT).

A relevância do projeto manifesta-se nos múltiplos avanços propiciados nos campos de monitoramento ambiental, visão computacional embarcada e robótica móvel aquática. Dentre os benefícios esperados, destaca-se a capacitação do veleiro autônomo para a execução de missões de longa duração, tais como a medição contínua de parâmetros físico-químicos da água, inspeção de ecossistemas frágeis (como recifes de corais) e patrulhamento de áreas marinhas protegidas com mínima intervenção humana. Além disso, a tecnologia desenvolvida possui caráter modular e replicável, podendo ser

estendida a outras plataformas aquáticas. O trabalho envolve aprimorar a parte relacionada ao software para posteriormente fazer a integração com o hardware.

Por fim, a pesquisa alinha-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). Notadamente, o projeto responde ao ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao prover ferramentas autônomas para monitoramento de recursos hídricos continentais; ao ODS 14 (Vida na Água), ao viabilizar o mapeamento não invasivo e conservação dos oceanos e ecossistemas marinhos; e ao ODS 17 (Parcerias e Meios de Implementação), promovendo a cooperação científica e fortalecendo a capacitação tecnológica nacional em robótica marítima. Formula-se, assim, a hipótese de que o algoritmo E-MVELSA integrado à visão 360 graus proporciona acurácia e F1-Score superiores aos métodos convolucionais e transformers tradicionais sob severo desbalanceamento aquático.

Metodologia

Método e Arquitetura Computacional
A abordagem metodológica adotada neste trabalho fundamenta-se no desenvolvimento, implementação e avaliação experimental do framework denominado E-MVELSA. O método baseia-se no confronto experimental do E-MVELSA proposto frente a três modelos consolidados na literatura de visão computacional: Redes Neurais Convolucionais (ResNet-18 e YOLOv8), Vision Transformers (ViT) e ao MVELSA em sua formulação tradicional.

Conjunto de Dados AQUA20 e Pré-processamento
A validação do sistema é conduzida utilizando o conjunto de dados público de referência AQUA20 (*AQUA20 benchmark dataset*), composto por 20 classes distintas de imagens subaquáticas, abrangendo organismos marinhos, peixes, recifes de corais e elementos do leito oceânico. O AQUA20 é caracterizado por elevada complexidade visual e condições desafiadoras, incluindo turbidez moderada a alta, oclusões parciais, iluminação não uniforme e acentuado desbalanceamento na distribuição de amostras entre as categorias.

Na fase de preparação de dados, as imagens brutas passam por etapas de redimensionamento e normalização. Para mitigar o sobreajuste (*overfitting*) e expandir a capacidade de generalização dos modelos baseline, aplica-se uma pipeline de aumento Latexde dados (*data augmentation*) composta por cortes aleatórios redimensionados (\textit{random resized crops}), espelhamento horizontal (\textit{horizontal flips}) e ajustes fotométricos de brilho, contraste e saturação. As divisões de treino e teste foram estabelecidas previamente e reservadas estritamente para a avaliação final.

Implementação dos Modelos de Referência (*Baselines*)
Para estabelecer um benchmark comparativo direto, implementaram-se e avaliaram-se três arquiteturas representativas do estado da arte.

Em relação a ResNet-18, adotou-se uma estratégia de aprendizado por transferência

(*transfer learning*) utilizando modelo pré-treinado no ImageNet. As imagens de entrada foram redimensionadas para *224 X 224 pixels* e normalizadas. A camada totalmente conectada final foi ajustada parA avaliação experimental do framework proposto E-MVELSA e dos modelos de referência consolidados na literatura foi conduzida sobre o conjunto de teste oficial do benchmark AQUA20. O AQUA20 compreende 20 categorias heterogêneas de imagens subaquáticas, contemplando espécies de fauna marinha, flora aquática, recifes de corais, invertebrados e elementos do substrato oceânico.a 20 saídas. O treinamento utilizou o otimizador Adam com taxa de aprendizado de 10^{-4} e decaimento de pesos, combinado com o agendador \textit{ReduceLROnPlateau} com base na perda de validação. A otimização utilizou a função de perda de Entropia Cruzada Ponderada (*weighted Cross-Entropy loss*) para contornar o desbalanceamento de classes.

O framework YOLOv8 foi empregado na variante YOLOv8m para balancear eficiência e precisão. O treinamento ocorreu via *Ultralytics* com resolução de entrada de *640 X 640 pixels* ao longo de 50 épocas, com otimização baseada em gradiente descendente estocástico e aumento de dados espacial e em mosaico. O desempenho foi monitorado via métricas de Precisão Média Média para seleção do melhor ponto de checagem.

O pipeline do ViT (modelo *google/vit-base-patch16-224*) compreende cinco etapas: a) *Patch Embedding* ; b) Codificação Posicional (adição de informações espaciais); c) Token de Classificação (CLS aprendível inserido na sequência); d) Auto-atenção Global Multi-cabeça (*Multi-Head Global Self-Attention*, conectando espacialmente todos os patches da cena); e e) Cabeça de Classificação (passagem do estado final do token por um Perceptron Multicamadas, MLP para estimar as probabilidades das 20 classes).

Implementação da Arquitetura Proposta: E-MVELSA

A arquitetura proposta E-MVELSA aperfeiçoa a abordagem do MVELSA ao introduzir um módulo de engenharia e refinamento de feições baseado em Análise de Componentes Principais (PCA) e Mapas Auto-Organizáveis (SOM). O fluxo operacional divide-se em quatro estágios principais.

No primeiro estágio, ocorre a extração de feições por meio de um conjunto de 60 autoencoders densos, organizados em paralelo, que geram um Espaço Latente Expandido robusto a partir das imagens brutas do AQUA20. Em seguida, no segundo estágio, aplica-se a PCA para reduzir redundâncias e ruídos, comprimindo o espaço inicial de 960 dimensões para 64 componentes principais que retêm 95% da variância. O terceiro estágio consiste no mapeamento topológico via SOM de Kohonen, estruturado em uma grade de 20×20 neurônios, capaz de agrupar padrões morfológicos semelhantes e produzir uma representação one-hot de 100 dimensões. Por fim, no quarto estágio, as feições do PCA e do SOM são concatenadas em um vetor de 164 dimensões, que alimenta um classificador linear raso treinado com LogSoftmax e otimização Adam, responsável por mapear as feições para as 20 classes do conjunto AQUA20. Essa integração entre redundância, redução dimensional, organização topológica e classificação eficiente garante maior robustez e precisão na identificação de objetos subaquáticos.

Resultados e Discussões

A avaliação experimental do framework proposto E-MVELSA e dos modelos de referência consolidados na literatura foi conduzida sobre o conjunto de teste oficial do benchmark AQUA20. O AQUA20 compreende 20 categorias heterogêneas de imagens subaquáticas, contemplando espécies de fauna marinha, flora aquática, recifes de corais, invertebrados e elementos do substrato oceânico.

Apresentação dos Dados Coletados e Desempenho Comparativo

O conjunto de dados é caracterizado por condições visuais extremamente desafiadoras, incluindo forte atenuação luminosa, distorções cromáticas, turbidez variável, oclusões parciais, iluminação não uniforme e acentuado desbalanceamento na amostragem entre as classes.

Para assegurar uma avaliação rigorosa e livre de sobreajuste, todas as métricas foram apuradas exclusivamente no conjunto de teste previamente reservado. A tabela a seguir apresenta a comparação quantitativa abrangente entre as abordagens avaliadas, reportando a Acurácia Global e os indicadores macro-ponderados (Precisão Macro, Recall Macro e F1-Score Macro). As métricas macro-ponderadas calculam a média aritmética simples das métricas individuais obtidas em cada uma das 20 classes, garantindo que categorias com menor número de amostras tenham exatamente o mesmo peso na avaliação global do sistema.

Tabela – Comparação de Desempenho Macro-Ponderado entre os Modelos Avaliados no Dataset AQUA20

Análise do Desempenho das Redes Convolucionais e Vision Transformer

A análise detalhada dos modelos baseline revela limitações conceituais e operacionais quando submetidos a imagens aquáticas não controladas sob desbalanceamento severo de classes. O modelo ResNet-18 serviu como referência convolucional sólida, alcançando a segunda melhor acurácia entre os baselines (86,17%). Todavia, a análise das métricas macro-ponderadas revela uma acentuada queda no Recall macro (0,74) e no F1-Score macro (0,77). O hiato de mais de 12 pontos percentuais entre a acurácia global e o Recall macro explicita a vulnerabilidade da rede convolucional em reconhecer classes minoritárias.

O detector YOLOv8n-cls apresentou comportamento similar, com acurácia de 84,93%, Precisão de 0,81, Recall de 0,73 e F1-Score de 0,76. A diferença de 1,24 pontos percentuais na acurácia em relação à ResNet-18 justifica-se pelo fato de a versão "Nano" ser um modelo extremamente leve, projetado para alta taxa de quadros por segundo em sistemas embarcados. No entanto, em imagens com forte espalhamento de luz e baixo contraste, as camadas convolucionais do YOLOv8n-cls sofrem perda de detalhes morfológicos de alta frequência, confundindo padrões de fundo e textura com objetos de interesse, o que reduziu a precisão geral.

A arquitetura Vision Transformer (ViT-Base) superou os baselines convolucionais em acurácia (89,27%) e Recall macro (0,90), alcançando F1-Score de 0,84. A vantagem do ViT reside no mecanismo de auto-atenção global, que divide a imagem em patches fixos

e processa a sequência completa simultaneamente, capturando dependências contextuais de longo alcance que escapam aos campos receptivos locais das convoluções. Contudo, a Precisão macro permaneceu moderada (0,81), demonstrando que o ViT, apesar de sua elevada capacidade representacional, é suscetível a gerar falsos positivos ao processar regiões de ruído aquático turbulento.

Análise Aprofundada do Framework E-MVELSA Proposto

Entre todas as abordagens avaliadas, a arquitetura proposta E-MVELSA entregou os resultados mais consistentes e elevados, alcançando uma acurácia global de 97,02%, acompanhada por um equilíbrio perfeito entre Precisão Macro (0,97) e Recall Macro (0,97), culminando em um F1-Score Macro de 0,97. Em comparação ao baseline ResNet-18, o E-MVELSA proporcionou uma evolução de quase 19 pontos percentuais no F1-Score macro. Além disso, o E-MVELSA superou a implementação tradicional do MVELSA (que registrou acurácia de 96,28% e F1-Score de 0,96), comprovando que o refinamento topológico introduzido pelos estágios de PCA e SOM agrega ganho discriminativo real à representação latente.

A razão fundamental para a superioridade do E-MVELSA reside na forma como o Espaço Latente Expandido trata a informação visual. Autoencoders convencionais baseados em gargalo único e comprimido forçam a redução drástica da dimensionalidade do sinal de entrada, o que invariavelmente resulta na perda de atributos morfológicos sutis, essenciais para distinguir categorias complexas. Em contrapartida, o MVELSA adota uma estratégia de redundância paralela, instanciando um conjunto de Autoencoders de Espaço Latente (ELSA) para cada uma das 20 classes do AQUA20. Como cada classe conta com 3 unidades autoencoder operando em paralelo, o sistema treina um total de 60 autoencoders densos.

Devido à inicialização estocástica com pesos e viéses aleatórios independentes, cada autoencoder segue uma trajetória de otimização única durante o treinamento guiado pelo Erro Quadrático Médio (MSE). Esse comportamento faz com que cada unidade se especialize no aprendizado de perspectivas e detalhes morfológicos complementares do mesmo sinal de entrada (como variações de contorno, frequências espaciais e gradientes de iluminação). A concatenação das saídas ocultas dessas 60 unidades gera o Espaço Latente Expandido (ELS) de dimensão N × L (960D), formando um repositório de feições altamente informativo e imune à supressão de atributos característicos de modelos de gargalo único.

A etapa subsequente de Análise de Componentes Principais (PCA) atua na filtragem e desacoplamento dessa hipermassa latente. Ao realizar a decomposição em valores

singulares (SVD) da matriz de covariância e reter 95% da variância acumulada, a PCA elimina dimensões não correlacionadas e ruídos estocásticos decorrentes da variação individual dos autoencoders, reduzindo o espaço de feições de 960 para 64 componentes principais ortogonais (64D).

Na sequência, o Mapa Auto-Organizável (SOM de Kohonen) recebe os 64 componentes do PCA e realiza um mapeamento não linear em uma grade bidimensional de 20 × 20 neurônios (400 neurônios no total). Por meio do aprendizado competitivo não supervisionado ao longo de 100 épocas, o SOM organiza topologicamente o espaço de feições, fazendo com que vetores com características morfológicas semelhantes ativem neurônios vizinhos na grade retangular. Ao concatenar as 64 feições do PCA com o vetor One-Hot de 100D derivado da Unidade de Melhor Ajuste (BMU) do SOM, gera-se uma representação combinada de 164D. Esse vetor composto oferece ao classificador linear raso um espaço de busca altamente estruturado e linearmente separável, permitindo atingir alta acurácia e convergir em poucas épocas via LogSoftmax e otimizador Adam.

Análise do Enfrentamento do Desbalanceamento de Dados e Distorções Ópticas

Uma das contribuições mais expressivas do E-MVELSA é sua robustez no tratamento de conjuntos de dados altamente desbalanceados e ruidosos. Nas redes convolucionais e no Vision Transformer, o desbalanceamento provoca um deslocamento no hiperplano de decisão em direção às classes majoritárias. No E-MVELSA, contudo, a extração de feições via ensemble de ELSA ocorre de forma dedicada para cada categoria, garantindo que até mesmo as classes minoritárias tenham modelos de autoencoder totalmente dedicados a aprender suas estruturas latentes sem interferência da distribuição de frequência do conjunto de dados.

Ademais, as distorções ópticas subaquáticas, como a atenuação diferencial da luz vermelha, o espalhamento de luz causado por partículas em suspensão e variações bruscas de contraste, afetam drasticamente as convoluções tradicionais, que dependem diretamente de gradientes de intensidade no espaço de cor original. No E-MVELSA, o treinamento paralelo de autoencoders com saídas latentes expandidas permite capturar invariâncias estruturais que independem de variações cromáticas locais, preservando a capacidade de classificação mesmo em imagens fortemente turvas ou com oclusões parciais.

Análise das Curvas de Aprendizado e Matrizes de Confusão

A avaliação gráfica da dinâmica de aprendizado reforça as conclusões obtidas a partir dos dados tabulares. As curvas de perda (Loss) e acurácia durante o treinamento e validação mostram que os baselines convolucionais (ResNet-18 e YOLOv8n) apresentaram oscilações frequentes na curva de validação. Esse comportamento reflete a dificuldade de generalização dessas redes profundas quando treinadas em cenários de alta heterogeneidade visual e amostragem restrita, sinalizando uma tendência ao sobreajuste nas classes mais abundantes.

Em contrapartida, as curvas de convergência da otimização conjunta do E-MVELSA demonstram um perfil de aprendizado suave e estável. Tanto o erro de reconstrução dos autoencoders quanto a perda do classificador final declinaram de forma monótona, atingindo estabilização a partir da 40ª época. Essa rápida e estável convergência comprova que a combinação do PCA com a organização topológica do SOM simplifica significativamente a tarefa de otimização da rede de classificação final.

As matrizes de confusão normalizadas oferecem uma visão detalhada da distribuição de acertos e erros para cada uma das 20 classes do AQUA20. Nos baselines ResNet-18, YOLOv8n e ViT, observa-se uma dispersão perceptível de predições fora da diagonal principal. Foram registradas confusões recorrentes entre categorias de benthos e substrato rochoso, bem como entre diferentes espécies de peixes pequenos que compartilham contornos corporais semelhantes sob iluminação deficiente. Nesses modelos convencionais, o Recall individual em classes raras caiu para patamares inferiores a 65%.

Por outro lado, a matriz de confusão do E-MVELSA destaca-se por uma concentração forte e uniforme de predições ao longo da diagonal principal. O modelo manteve elevadas taxas de acerto (Recall individual superior a 0,92) mesmo nas categorias minoritárias do AQUA20. Esse achado valida experimentalmente a hipótese central da pesquisa: a combinação da redundância do espaço latente expandido com o refinamento ortogonal do PCA e a codificação topológica do SOM proporciona uma representação de feições imune ao viés do desbalanceamento de classes, assegurando alta precisão e sensibilidade em todas as categorias.

Comparação dos Resultados com a Literatura Consultada

Os resultados experimentais alcançados pelo E-MVELSA alinham-se e trazem avanços significativos em relação às discussões presentes no estado da arte da visão computacional para o ambiente aquático e subaquático.

A literatura científica aponta de forma consistente que a detecção e classificação de objetos em ambientes aquáticos não controlados enfrenta graves obstáculos decorrentes de poses arbitrárias, oclusões, iluminação deficiente e alta turbidez. Para contornar essas degradações ópticas, diversas abordagens recentes propõem módulos complexos de pré-processamento e restauração de imagem. Por exemplo, Zhao et al. (2025) empregaram a Residual Dense Network (RDN) para restaurar detalhes de alta frequência na identificação de detritos no leito marinho em Koh Tao (Tailândia), enquanto Zhao et al. (2024) utilizaram a Residual Channel Attention Network (RCAN) acoplada a scanners aéreo-aquáticos para monitoramento de lixo fluvial. Do mesmo modo, Liu et al. (2026) introduziram o Hydro-Depth Enhance Module (HDEM), que aplica princípios físicos da ótica subaquática para corrigir variações cromáticas e atenuação da luz.

Embora eficazes, esses métodos exigem redes de restauração pesadas encadeadas antes do classificador, o que aumenta substancialmente a latência e o consumo computacional. Em contrapartida, o E-MVELSA atingiu 97,02% de acurácia operando diretamente sobre as imagens brutas, demonstrando que a extração de feições via autoencoders paralelos expandidos possui imunidade intrínseca a distorções fotométricas locais, dispensando módulos prévios de restauração.

No âmbito das aplicações em robótica marítima e veículos autônomos (AUVs e USVs), o mapeamento de fauna, estimativa de biomassa e monitoramento de ecossistemas têm sido tradicionalmente executados por redes convolucionais e detectores baseados em regiões (KAVETI; SINGH, 2018; CHENG, 2024; WALKER et al., 2021). Trabalhos específicos aplicaram visão computacional na identificação de camarões em aquicultura (WU et al., 2026), no rastreamento in situ de plâncton (BERGUM et al., 2020) e no reconhecimento de ouriços-do-mar (RAWLINSON et al., 2025) utilizando a Mask R-CNN e a plataforma UrchinBot. Revisões abrangentes conduzidas por Ozdilli et al. (2021) e Benard et al. (2026) enfatizam que a classificação de vertebrados e invertebrados marinhos a partir de vídeos subaquáticos e imagens de satélite frequentemente requer a fusão de múltiplos modelos para lidar com a heterogeneidade das cenas. O E-MVELSA posiciona-se como uma alternativa mais eficiente a essas redes profundas, superando baselines convolucionais e o Vision Transformer no benchmark AQUA20 com menor complexidade paramétrica.

A trajetória metodológica do MVELSA evidencia sua capacidade de generalização em diferentes domínios. Concebido originalmente a partir do autoencoder ELSA (Expanded Latent Space Autoencoder) (VILAR DE OLIVEIRA; ARAGÃO; GONÇALVES, 2024), projetado para superar as limitações de compressão dos autoencoders tradicionais, o MVELSA foi aplicado primeiramente na previsão de séries temporais multivariadas durante a pandemia de COVID-19 (OLIVEIRA; ARAGÃO; GONÇALVES, 2024; ARAGÃO et al., 2022), demonstrando capacidade de lidar com incerteza e múltiplas variáveis epidemiológicas e climáticas. Em seguida, a abordagem foi estendida para o processamento de imagens de sensoriamento remoto na classificação de cobertura do solo com o conjunto EuroSAT (OLIVEIRA;

GONÇALVES, 2024). O presente trabalho consolida a expansão bem-sucedida do E-MVELSA para a classificação de imagens subaquáticas, comprovando que a preservação e refinamento do espaço latente expandido é uma estratégia genérica e eficaz para domínios visuais de alta complexidade.

Análise da Qualidade da Organização Topológica do SOM

A validação da qualidade do mapeamento topológico realizado pelo SOM no framework E-MVELSA foi efetuada através das métricas formais de erro de quantização (quantization error) e erro topográfico (topographic error), acompanhadas da análise da Matriz de Distâncias Unificadas (U-Matrix).

O erro de quantização mede a distância euclidiana média entre os vetores de feições latentes reduzidos pelo PCA (64D) e os vetores de pesos do neurônio vencedor (BMU) correspondente. O valor reduzido alcançado pelo erro de quantização ao término do treinamento indica que a grade de 20 × 20 neurônios consegue mapear com alta fidelidade a distribuição espacial das feições latentes. O erro topográfico, por sua vez, avalia a proporção de amostras em que o primeiro e o segundo neurônios mais próximos não são vizinhos adjacentes na grade. O valor mínimo obtido para o erro topográfico confirma que o SOM preservou a continuidade topológica do espaço latente expandido.

A inspeção visual da U-Matrix evidencia a formação de aglomerados (clusters) nitidamente delimitados por fronteiras de alta distância inter-neuronal. Amostras pertencentes a organismos marinhos com estruturas morfológicas semelhantes foram mapeadas em regiões contíguas da matriz, enquanto elementos de substrato e água aberta foram isolados em agrupamentos distintos. Essa estruturação topológica simplifica a tarefa do classificador linear final, explicando a rápida convergência e a alta precisão obtida sem a necessidade de classificadores não lineares profundos.

Aplicações Práticas no Monitoramento Marítimo e Recifes de Corais

A alta eficácia demonstrada pelo E-MVELSA na classificação de objetos subaquáticos heterogêneos viabiliza sua aplicação direta em tarefas de monitoramento ambiental de recifes de corais, mapeamento ecológico e preservação de ecossistemas marinhos.

O sistema oferece uma metodologia robusta e prática para a coleta automatizada de dados ambientais em regiões aquáticas vulneráveis. Entre as aplicações concretas, destacam-se:

1- Avaliação de Saúde de Recifes de Corais: Identificação precisa de colônias de corais e anêmonas, permitindo o acompanhamento de episódios de branqueamento e degradação estrutural do benthos.

2- Mapeamento de Biodiversidade e Biomassa: Reconhecimento in situ de peixes, vertebrados e invertebrados marinhos para inventários ecológicos automatizados.

3- Rastreamento de Resíduos Aquáticos: Detecção e classificação de plásticos, lixo marinho e detritos em suspensão ou depositados no fundo oceânico.

4- Percepção para Veículos Autônomos: Integração da ferramenta de classificação em sistemas de percepção visual para veículos de superfície não tripulados (USVs) e veículos subaquáticos autônomos (AUVs), apoiando tarefas de desvio de obstáculos e navegação autônoma em missões de monitoramento com intervenção humana mínima.

Graças ao processamento baseado em feições latentes compactadas por PCA e codificadas por SOM, o E-MVELSA possui baixo custo computacional na etapa de inferência. Essa eficiência facilita sua embarcação em hardware de processamento compacto (como placas Nvidia Jetson Xavier conectadas a câmeras ZED), promovendo o avanço das tecnologias de monitoramento autônomo e sustentável dos ecossistemas marinhos.

Publicações Resultantes do Projeto

Como resultados científicos (artigos) desta pesquisa, foram publicados dois artigos diretamente relacionados com o tema (Dantas, 2026; Meneses, 2026A), e um terceiro também com temática em Visão Computacional está submetido (Meneses, 2026B). No primeiro artigo (Dantas, 2026) tratamos da parte inicial das contribuições do presente artigo, onde propomos a abordagem de representação multivariada baseada em autoencoders, denominada MVELSA, para a classificação de imagens subaquáticas, que serviu de base para o presente artigo. Basicamente, a ideia é que o sistema instancie múltiplos autoencoders independentes, em vez de depender de apenas um para a

extração de características; isso permite capturar diferentes nuances estatísticas dos dados no espaço latente de cada autoencoder.

O segundo artigo (Meneses, 2026A) trata de uma metodologia programática para gerar conjuntos de dados sintéticos em larga escala, utilizando uma abordagem de aumentação de dados baseada em IA generativa. O pipeline transforma um conjunto limitado de imagens reais em um conjunto de dados diversificado, introduzindo variações controladas nos estados do mar, condições meteorológicas, iluminação e uma ampla gama de obstáculos. A metodologia inclui módulos para garantir o realismo das imagens, validar a preservação dos objetos de interesse e minerar "exemplos difíceis" (hard examples), a fim de concentrar o treinamento em cenários de alta complexidade.

Por fim, o terceiro artigo trata das contribuições relatadas acima, no presente artigo, juntando também com o anterior (Meneses, 2026B). Este último artigo está submetido ao Workshop de Visão Computacional, Campinas, SP, a ser realizado em novembro de 2026.

Conclusão

Este trabalho apresentou o desenvolvimento, implementação e validação experimental da arquitetura E-MVELSA (Enhanced Multi-variable Expanded Latent Space Autoencoder) para a classificação de imagens aquáticas no domínio subaquático, com foco em cenários de alta complexidade visual como ambientes de recifes de corais.

A hipótese central da pesquisa foi confirmada pelos resultados experimentais obtidos sobre o conjunto de dados de referência público AQUA20 (composto por 20 classes de objetos e organismos subaquáticos). O framework E-MVELSA alcançou uma acurácia global de 97,02% e um F1-Score macro de 0,97, superando de forma consistente os modelos baseline consolidados na literatura de visão computacional, incluindo o Vision Transformer ViT-Base (acurácia de 89,27% e F1-Score de 0,84), o modelo convolucional ResNet-18 (acurácia de 86,17% e F1-Score de 0,77), o detector em tempo real YOLOv8n-cls (acurácia de 84,93% e F1-Score de 0,76) e o MVELSA tradicional sem PCA/SOM (acurácia de 96,28% e F1-Score de 0,96).

A principal contribuição metodológica do trabalho reside na demonstração de que a extração de feições via conjunto (ensemble) de autoencoders paralelos operando sob inicialização estocástica gera um Espaço Latente Expandido (ELS) rico em detalhes morfológicos complementares. A integração subsequente da PCA (que retém 95% da variância acumulada e elimina ruídos em 64 dimensões ortogonais) com a organização topológica do SOM (grade 20 × 20) constrói uma representação de 164 dimensões altamente discriminativa e linearmente separável. Esse arranjo provou ser extraordinariamente eficaz na mitigação dos efeitos adversos do severo desbalanceamento de classes e das distorções ópticas subaquáticas (como atenuação luminosa, turbidez e oclusões parciais), superando modelos convolucionais sem a

necessidade de módulos pesados de pré-processamento ou restauração prévia de imagem.

Além de sua relevância teórica para a visão computacional aquática, a arquitetura E-MVELSA também possui alto valor aplicado, pois sua capacidade de classificar objetos em cenários subaquáticos heterogêneos viabiliza avanços em monitoramento ecológico de recifes de corais, identificação de espécies marinhas, rastreamento de plásticos e suporte à navegação autônoma em USVs; como continuidade, recomenda-se sua implantação em sistemas embarcados de processamento em tempo real, utilizando câmeras estéreo ZED acopladas a uma placa Nvidia Jetson Xavier, com testes online em recifes de corais para avaliar a resiliência do modelo em ambientes dinâmicos e expandir a base de dados com novas variações sazonais e operacionais.

Referências

AGUIAR, Rodrigo; BERTINI, Luciano; COPETTI, Alessandro; CLUA, Esteban Walter Gonzalez; GONÇALVES, Luiz Marcos Garcia; MOREIRA, Leonard Barreto. Semantic Segmentation and Regions of Interest for Obstacles Detection and Avoidance in Autonomous Surface Vessels. In: LATIN AMERICAN ROBOTICS SYMPOSIUM (LARS), 2023, Salvador. Proceedings... Los Alamitos: IEEE Xplore, 2023. p. 403-408.

ALVES, José C.; CRUZ, Nuno A. Fast – an autonomous sailing platform for oceanographic missions. In: IEEE/OES OCEANS 2008, 2008, Quebec City. Proceedings... Quebec City: IEEE, 2008. p. 1-7.

ARAGÃO, Diego P.; OLIVEIRA, Eron V.; BEZERRA, Alessandro A.; SANTOS, Davi H.; SILVA JUNIOR, Andouglas G.; PEREIRA, Isabela G.; PISCITELLI, Prisco; MIANI, Alessandro; DISTANTE, Cosimo; CUNO, J. S.; CONCI, Aura; GONÇALVES, Luiz M. G. Multivariate data driven prediction of COVID-19 dynamics: Towards new results with temperature, humidity and air quality data. Environmental Research, v. 204, p. 112348, 2022.

BENARD, A.; AMASSAH, H. N.; FEUILLOLEY, G. Deep learning methods for detecting marine vertebrates and invertebrates from satellite, aerial, and underwater imagery: A review. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, v. 210, p. 104200, 2026.

BERGUM, S.; SAAD, A.; STAHL, A. Automatic in-situ instance and semantic segmentation of planktonic organisms using Mask R-CNN. In: GLOBAL OCEANS 2020: SINGAPORE U.S. GULF COAST, 2020, Biloxi. Proceedings... IEEE, 2020. p. 1-8.

CHENG, Z. Design of autonomous object detection system for USV. Lecture Notes in Electrical Engineering, v. 1253, p. 194-202, 2024.

DANTAS, Igor Matias de Lima; MENESES SANTOS, Lidia G. D. de; BEZERRA, Arthur Andrade; OLIVEIRA, Emerson Vilar de; GUERIN, Joris; CLUA, Esteban W.

G.; GONÇALVES, Luiz Marcos Garcia. Multi-Variable Expanded Latent Space Autoencoder for Underwater Image Classification. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON ROBOTICS (CROS), 2026. Proceedings... Piscataway: IEEE, 2026. p. 67-72. DOI: https://doi.org/10.1109/CROS69211.2026.11565791.

ELGENDY, Mohamed. Deep Learning for Vision Systems. Shelter Island: Manning Publications, 2020.

GOMES, Luís; SANTOS, Miguel; PEREIRA, Thiago; COSTA, Anikó. Model-based development of an autonomous sailing yacht controller. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTONOMOUS ROBOT SYSTEMS AND COMPETITIONS (ICARSC), 2015, Vila Real. Proceedings... IEEE, 2015. p. 103-108.

GOODFELLOW, Ian; BENGIO, Yoshua; COURVILLE, Aaron. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016.

HAYKIN, Simon. Neural Networks and Learning Machines. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2009.

HE, Kaiming; ZHANG, Xiangyu; REN, Shaoqing; SUN, Jian. Deep residual learning for image recognition. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION (CVPR), 2016, Las Vegas. Proceedings... IEEE, 2016. p. 770-778.

IQBAL, A.; GARCIA, M. G.; CHELLAPPAN, L.; GANS, N. Object detection and classification for small objects in/on water. Journal of Electronic Imaging, v. 31, n. 4, p. 043015, 2022.

JÚNIOR, Andouglas G. S.; ARAÚJO, André P. D.; SILVA, Marcus V. A.; AROCA, Rafael V.; GONÇALVES, Luiz M. G. N-Boat: an autonomous robotic sailboat. In: LATIN AMERICAN ROBOTICS SYMPOSIUM AND COMPETITION (LARS/LARC), 2013, Arequipa. Proceedings... IEEE, 2013. p. 24-29.

KAVETI, P.; SINGH, H. Towards automated fish detection using convolutional neural networks. In: OCEANS - MTS/IEEE KOBE TECHNO-OCEANS, 2018, Kobe. Proceedings... IEEE, 2018. p. 1-6.

LIU, Y.; ZHANG, X.; ZHU, J. HDANet: Enhancing underwater salient object detection with physics-inspired multimodal joint learning. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 64, p. 1-14, 2026.

MAITI, Bhaskar. Practical Computer Vision Applications Using Deep Learning with CNNs. Berkeley: Apress, 2021.

MENESES SANTOS, Lidia G. D.; DANTAS, Igor Matias de Lima; BEZERRA, Arthur Andrade; BENAISSA, Ilyes; OLIVEIRA, Emerson Vilar de; DISTANTE, Cosimo; CLUA, Esteban W. G.; GONÇALVES, Luiz Marcos Garcia. Generative-Augmented Maritime Navigation Dataset: A Deep Synthetic Data Generation Framework. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON ROBOTICS (CROS), 2026. Proceedings...

Piscataway: IEEE, 2026. p. 61-66. DOI: https://doi.org/10.1109/CROS69211.2026.11565537.

MENESES SANTOS, Lidia G. D.; GONÇALVES, Luiz Marcos Garcia. Validating Physical Consistency in Deep Learning for Higgs Boson Discovery using Explainable AI. Submitted to: WORKSHOP OF COMPUTER VISION (WVC), 2026. Proceedings... Porto Alegre: Sol-SBC, 2026. p. 01-06.

NEGREIROS, Álvaro P. F.; CORRÊA, Wanderson S.; ARAÚJO, André P. D.; SANTOS, Davi H.; VILAS-BOAS, João M.; DIAS, Daniel H. N.; CLUA, Esteban W. G.; GONÇALVES, Luiz M. G. Sustainable Solutions for Sea Monitoring With Robotic Sailboats: N-Boat and F-Boat Twins. Frontiers in Robotics and AI, v. 9, p. 1-12, 2022.

OLIVEIRA, Eron V.; GONÇALVES, Luiz M. G. An expanded latent space autoencoder for land cover classification of remote sensing images from EuroSAT. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON ROBOTICS (SBR), 2024, Goiânia. Proceedings... IEEE, 2024. p. 156-161.

OLIVEIRA, Eron V.; ARAGÃO, Diego P.; GONÇALVES, Luiz M. G. A new auto-regressive multi-variable modified auto-encoder for multivariate time-series prediction: A case study with application to COVID-19 pandemics. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 21, n. 4, p. 497, 2024.

RAWLINSON, K.; SPYKSMA, A. J.; MILLER, K. I. Urchinbot: An open-source model for the rapid detection and classification of habitat-modifying sea urchin species. Marine Environmental Research, v. 205, p. 106890, 2025.

SANTOS, Davi H.; SILVA JUNIOR, Andouglas G.; NEGREIROS, Álvaro P. F.; VILAS BOAS, João M.; ÁLVAREZ, Justo E.; ARAÚJO, André P. D.; AROCA, Rafael V.; GONÇALVES, Luiz M. G. Design and Implementation of a Control System for a Sailboat Robot. Robotics, v. 5, n. 1, p. 5, 2016.

SILVA JUNIOR, Andouglas G.; SANTOS, Davi H.; NEGREIROS, Álvaro P. F.; SILVA, João M. V. B. S.; GONÇALVES, Luiz M. G. High-Level Path Planning for an Autonomous Sailboat Robot Using Q-Learning. Sensors, v. 20, n. 6, p. 1550, 2020.

SILVA JUNIOR, Andouglas G.; SÁ, Sarah T. L.; SANTOS, Davi H.; NEGREIROS, Álvaro P. F.; SILVA, João M. V. B. S.; JÁCOBO

SOLARMSETTER, V. Object Detection with YOLO: Unified, Real-Time Object Detection. Birmingham: Packt Publishing, 2022.

SRIRAM, S.; HAVALDAR, P. Analytical review and study on object detection techniques in the image. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, v. 12, n. 3, p. 2150012, 2021.

VILAR DE OLIVEIRA, Eron; ARAGÃO, Diego P.; GONÇALVES, Luiz M. G. ELSA: Expanded latent space autoencoder for image feature extraction and classification. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON COMPUTER VISION, IMAGING

AND COMPUTER GRAPHICS THEORY AND APPLICATIONS (VISIGRAPP), 19., 2024, Rome. Proceedings... Setúbal: SCITEPRESS, 2024. p. 703-710.

WALKER, J.; BENNETT, A. P.; THORNTON, B. Towards observation condition agnostic fauna detection and segmentation in seafloor imagery for biomass estimation. In: IEEE/OES OCEANS 2021, 2021, San Diego. Proceedings... IEEE, 2021. p. 1-7.

WU, B.-C.; HUANG, C.-K.; TENG, P.-S. Computer vision-based real-time underwater shrimp monitoring and weight estimation for sustainable aquaculture. Journal of Supercomputing, v. 82, n. 3, p. 1-18, 2026.

ZHAO, F.; HUANG, B.; WANG, J. Seafloor debris detection using underwater images and deep learning-driven image restoration: A case study from Koh Tao, Thailand. Marine Pollution Bulletin, v. 201, p. 116200, 2025.

ZHAO, F.; LIU, Y.; WANG, J. Riverbed litter monitoring using consumer-grade aerial-aquatic speedy scanner (AASS) and deep learning based super-resolution reconstruction and detection network. Marine Pollution Bulletin, v. 198, p. 115900, 2024.

Anexos



Pipeline detalhado de extração, refinamento e classificação de características na arquitetura computacional E-MVELSA.



Comparação de desempenho global e macro-ponderado dos modelos no conjunto de teste AQUA20.



nálise comparativa de tempo de processamento e parâmetros operacionais no ambiente de experimento.

CÓDIGO: ET1476

AUTOR: GABRIEL DE AMORIM VERA

ORIENTADOR: CARLSON PEREIRA DE SOUZA

TÍTULO: ESTUDO DA EXTRAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA A EXTRAÇÃO DO BIO-ÓLEO DA CANNABSI SATIVA GENÉTICA GORILLA AC/DC

Resumo

A padronização da extração sólido-líquido em aparelho Soxhlet é fundamental para garantir a reprodutibilidade fitoquímica e a viabilidade técnica de insumos terapêuticos. Este trabalho avaliou a cinética e o equilíbrio difusivo da extração etanólica de folhas secas de crajiru (Arrabidaea chica), utilizada como matriz vegetal modelo para estabelecer parâmetros de transferência de massa e modelagem matemática aplicáveis à futura extração de fitocanabinoides de Cannabis sativa. O estudo empregou um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2^2 + axiais + ponto central, totalizando 10 ensaios, avaliando a razão sólido/líquido (2,0 a 8,0 g/150 mL) e o tempo de refluxo (1,0 a 1,4 h). Os rendimentos mássicos variaram de 2,21% a 42,37%, com recuperação de etanol de até 92,00%. A menor carga de biomassa (2,0 g) favoreceu a percolação convectiva e reduziu limitações difusivas, sendo 2,0 g e 1,2 h a melhor condição operacional, com 28,79% de rendimento e 89,33% de recuperação etanólica. A ANOVA e o Diagrama de Pareto indicaram a interação entre massa e tempo como o termo de maior magnitude sobre o rendimento (Fcalc = 6,8603; p = 0,0588). O modelo ajustado validou os ciclos térmicos próximos ao ponto de ebulição do etanol (78 °C), sem evidências de degradação dos compostos polifenólicos, fornecendo parâmetros para futuras extrações de CBD e Δ9-THC e contribuindo para o desenvolvimento de fitoterápicos destinados ao alívio de dor neuropática e inflamações associadas à hanseníase.

Palavras-chave: Arrabidaea chica; Cannabis sativa; Extração por Soxhlet; DCCR; Canabin

TITLE: Study on Extraction and Parameter Optimization for Bio-oil from Cannabis sativa Strain Gorilla AC/DC

Abstract

The standardization of solid-liquid extraction using a Soxhlet apparatus is essential to ensure phytochemical reproducibility and the technical feasibility of therapeutic products. This study evaluated the kinetics and diffusional equilibrium of the ethanolic

extraction of dried crajiru (Arrabidaea chica) leaves, used as a model plant matrix to establish mass transfer parameters applicable to the future extraction of phytocannabinoids from Cannabis sativa. A Central Composite Rotatable Design (CCRD) was employed, comprising 10 experiments that evaluated the solid-to-liquid ratio (2.0–8.0 g/150 mL) and reflux time (1.0–1.4 h). Mass yields ranged from 2.21% to 42.37%, while ethanol recovery reached 92.00%. Lower biomass loading (2.0 g) favored convective percolation and reduced diffusional limitations. The condition of 2.0 g and 1.2 h of reflux provided the best operational balance, achieving a 28.79% mass yield and 89.33% ethanol recovery. ANOVA and the Pareto chart indicated that the interaction between biomass mass and extraction time had the greatest effect on yield (Fcalc = 6.8603; p = 0.0588). The fitted model validated thermal cycles near ethanol's boiling point (78 °C), without evidence of polyphenolic compound degradation, providing parameters for future CBD and Δ9-THC extraction. These findings may contribute to the development of phytotherapeutic products aimed at alleviating neuropathic pain and inflammation associated with leprosy.

Keywords: Arrabidaea chica; Cannabis sativa; Soxhlet extraction; CCRD; Cannabino

Introdução

A busca por compostos bioativos naturais tem impulsionado a pesquisa fitofarmacêutica na busca por alternativas terapêuticas eficazes e com menor incidência de efeitos adversos. Entre as espécies de interesse destacam-se o crajiru (Arrabidaea chica, sinônimo aceito Fridericia chica) e a Cannabis sativa L., devido à riqueza de suas matrizes fitoquímicas e ao potencial farmacológico de seus metabólitos secundários.

Nativo das regiões tropicais da América do Sul e amplamente distribuído na Amazônia brasileira, o crajiru é tradicionalmente utilizado na medicina popular por meio de infusões e decocções de suas folhas. Seu uso está relacionado ao tratamento de afecções gastrointestinais e inflamatórias, além de aplicações tópicas como cicatrizante e adstringente. Essas propriedades estão associadas à presença de compostos fenólicos, principalmente flavonoides, taninos e 3-desoxiantocianidinas, com destaque para a carajurina, que apresentam atividades antioxidantes e anti-inflamatórias.

A Cannabis sativa apresenta um fitocomplexo constituído principalmente por fitocanabinoides, como canabidiol (CBD) e Δ9-tetrahidrocanabinol (Δ9-THC), além de CBG, CBN e diversos terpenos. Esses compostos têm sido investigados por sua ação sobre o sistema endocanabinoide e seu potencial no manejo da dor crônica, neuropatias, epilepsia e processos inflamatórios.

Nos tecidos vegetais, os canabinoides são encontrados predominantemente como precursores ácidos, como CBDA e Δ9-THCA. A conversão para CBD e Δ9-THC ocorre por descarboxilação, favorecida pelo aquecimento controlado. O controle de temperatura e tempo é essencial, pois condições excessivas podem causar degradação dos compostos e perdas de substâncias voláteis.

A recuperação dos bioativos depende do método de extração e das propriedades do solvente. Entre as técnicas disponíveis estão maceração, ultrassom, micro-ondas,

extração enzimática, fluidos supercríticos e extração sólido-líquido. Apesar da elevada seletividade do CO_2 supercrítico, seu alto custo e complexidade limitam sua aplicação. Nesse contexto, o aparelho Soxhlet constitui uma alternativa clássica e eficiente, baseada em ciclos contínuos de condensação e refluxo do solvente, favorecendo a transferência de massa e o esgotamento da matriz vegetal.

A polaridade do solvente influencia diretamente a seletividade do processo. Solventes polares e misturas hidroalcoólicas favorecem a extração de compostos fenólicos do crajiru, enquanto sistemas alcoólicos podem favorecer a recuperação de fitocanabinoides e terpenos. O controle térmico é igualmente importante para garantir eficiência e preservar compostos termolábeis.

Devido às restrições regulatórias e à disponibilidade controlada de Cannabis sativa nas etapas iniciais do projeto, o crajiru foi utilizado como biomassa vegetal modelo. Sua disponibilidade, segurança no manuseio e riqueza em metabólitos secundários permitem a padronização de parâmetros como granulometria, tempo de extração e volume de solvente antes da aplicação à Cannabis.

Assim, este trabalho tem como objetivo investigar e modelar os parâmetros operacionais da extração em Soxhlet aplicada às folhas de crajiru e às inflorescências de Cannabis sativa, avaliando a influência dos solventes e dos ciclos térmicos sobre o rendimento e a integridade dos metabólitos, visando estabelecer uma metodologia reprodutível para a obtenção de extratos de interesse fitoterápico e farmacêutico.

Metodologia

O emprego de ferramentas de planejamento experimental constitui uma abordagem estatística e matemática indispensável na otimização de bioprocessos e extrações de matrizes vegetais complexas. Essa metodologia permite a investigação simultânea de múltiplos parâmetros operacionais — tais como massa de biomassa sólida, tempo de ciclo e razão sólido-solvente —, minimizando o número total de ensaios requeridos sem comprometer a robustez analítica, além de identificar com precisão os efeitos principais, quadráticos e os fenômenos de interação sinérgica ou antagônica entre as variáveis independentes que regem as respostas de rendimento e pureza dos metabólitos secundários. No presente estudo voltado à extração sólido-líquido em aparelho Soxhlet para as folhas de crajiru (Arrabidaea chica) e posterior transposição para as inflorescências de Cannabis sativa, adotou-se o delineamento fatorial do tipo 23 + 2, estruturado em oito pontos fatoriais nos níveis (-1) e (+1) associados a duas repetições no ponto central (0). Esse arranjo experimental viabilizou o cálculo do erro puro residual, a verificação da curvatura do sistema e a validação do modelo matemático via Análise de Variância (ANOVA), estabelecendo condições térmicas e difusivas precisas para a máxima recuperação das frações bioativas de interesse medicinal.
O protocolo experimental iniciou-se com a coleta do material botânico das folhas de crajiru (Arrabidaea chica (Humb. & Bonpl.) B. Verl.), realizada nas imediações do Laboratório de Materiais Nanoestruturados e Reatores Catalíticos (LAMNRC), infraestrutura que também disponibilizou os equipamentos analíticos e reagentes empregados nesta pesquisa.

A biomassa vegetal fresca foi submetida à dessecação por convecção em estufa de ar circulante a 35ºC durante um intervalo de 48 horas, visando a redução substancial do teor de umidade residual a níveis mínimos sem comprometer a estabilidade térmica dos metabólitos secundários de interesse terapêutico. Após a secagem, as folhas foram desintegradas com o auxílio de um moinho de lâminas rotativas para diminuição da granulometria, ampliando a área superficial de contato sólido-líquido e otimizando os fenômenos de transferência de massa durante o processo extrativo.

2.2. Procedimento de Extração por Soxhlet e Concentração

Para os ensaios de extração contínua sólido-líquido, empregou-se o extrator Soxhlet acoplado a um banho termostatizado de condensação e sistema de vácuo. Em cada ciclo experimental, utilizou-se um volume fixo de 150 mL de etanol 96 P.A. como fase líquida de arraste e dissolução. Concluído o tempo de refluxo pré-estabelecido pelo planejamento, a mistura miscella (solvente–extrato) foi transferida para um evaporador rotativo com banho-maria sob rotação constante, promovendo a recuperação do etanol e a concentração da fração fitoquímica até a estabilização visível da densidade e viscosidade do concentrado lipofílico/resinoso.

O extrato bruto concentrado foi quantificado gravimetricamente em balança analítica de precisão para a determinação do rendimento mássico global. Em seguida, as frações foram acondicionadas em frascos âmbar herméticos e revestidos com folha de alumínio, minimizando a incidência de radiação luminosa para prevenir reações indesejadas de fotodegradação ou fotooxidação dos compostos ativos. O volume de etanol recuperado no condensador foi registrado para avaliar a eficiência do balanço de solvente no circuito.

2.3. Planejamento Experimental e Tratamento Estatístico

Com a finalidade de modelar e avaliar as condições ótimas de extração dos metabólitos secundários do crajiru (Arrabidaea chica) como plataforma inicial de correlação para a posterior extração de canabinoides (canabidiol - CBD e Δ9-tetrahidrocanabinol - Δ9-THC) de Cannabis sativa, adotou-se um Delineamento Composto Central (DCC). Os fatores independentes investigados foram a massa de biomassa vegetal seca (Massa) e o tempo de refluxo contínuo no extrator Soxhlet (t Soxhlet). As variáveis de resposta analisadas foram o rendimento percentual de extrato obtido (Rend%) e o percentual de solvente etanólico recuperado (Álcool Rec%), totalizando 10 ensaios experimentais conforme as condições matriciais codificadas.

A validação do modelo matemático e a significância dos efeitos lineares, quadráticos e de interação entre os fatores foram avaliadas por meio da Análise de Variância (ANOVA), adotando-se o nível de significância de 95 ($p < 0,05$). Diagramas de Pareto foram construídos para identificar os parâmetros estatisticamente determinantes sobre o processo extrativo. Adicionalmente, foram gerados gráficos de correlação entre os valores experimentais observados e os preditos pelo modelo ajustado. O tratamento e a análise estatística dos dados foram executados com o auxílio do software Statistica 7.0.

tabela 1

tabela 2

Resultados e Discussões

A avaliação experimental da extração sólido-líquido em extrator Soxhlet aplicada às folhas de crajiru (Arrabidaea chica) foi conduzida a partir de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) do tipo 22 + axiais + ponto central, estruturado para modelar a influência da razão sólido/líquido(S/L, de 2,0 a 8,0g/150mL, fator A) e do tempo de ciclo de refluxo contínuo (t, de 1,0 a 1,4h, fator B) sobre o rendimento mássico percentual e a taxa de recuperação do solvente etanólico (Nde & Foncha, 2020; Lazarjani et al., 2021). A matriz de planejamento totalizou dez ensaios executados em ordem aleatorizada (Ensaios 8, 9, 10, 5, 7, 2, 6, 3, 4 e 1) para mitigar a propagação de erros sistemáticos ao longo das bateladas (Grijó et al., 2018; Grijó et al., 2019). Essa configuração experimental reuniu quatro pontos fatoriais nos níveis codificados (± 1), correspondendo aos Ensaios 1 (2,9g; 1,1h), 2 (7,1g; 1,1h), 3 (2,9g;1,3h) e 4 (7,1g;1,3h); quatro pontos axiais ou estelares nos níveis (±α), com $\alpha = \sqrt{2} \approx 1{,}41$ para assegurar a propriedade de rotacionalidade do modelo, contemplando os Ensaios 5 (2,0g; 1,2h), 6 (8,0g; 1,2h), 7 (5,0g; 1,0h) e 8 (5,0 g; 1,4h); e duas repetições no ponto central (0,0), representadas pelos Ensaios 9 e 10 (5,0 g; 1,2h) (Grijó et al., 2018; Nde & Foncha, 2020). A inclusão dos pontos axiais viabilizou a estimativa dos coeficientes quadráticos e de curvatura para o ajuste do modelo polinomial de segunda ordem com termos de interação $Y = \beta 0 + \beta 1\ X1 + \beta 2\ X2 + \beta 11\ X12 + \beta 22\ X22 + \beta 12\ X1\ X2 + \varepsilon$, enquanto a duplicata central forneceu uma estimativa independente da variância do erro puro experimental frente à falta de ajuste (Nde & Foncha, 2020).

A análise gravimétrica dos extratos concentrados evidenciou ampla dispersão nos rendimentos globais obtidos, oscilando entre 2,21% (Ensaio 2) e 42,37% (Ensaio 1), demonstrando que a razão sólido/líquido exerce efeito pronunciado sobre os fenômenos de transporte na câmara de refluxo (Sovová, 1994; Nde & Foncha, 2020). Os experimentos operados sob menores cargas de biomassa vegetal (2,0 a 2,9g) apresentaram rendimentos médios substancialmente superiores, conforme observado nos Ensaios 1 (42,37%), 5 (28,79%) e 3 (17,49%), uma vez que leitos menos volumosos favorecem a circulação convectiva do solvente renovado em contato íntimo com a matriz particulada (Sovová, 1994). Em contrapartida, a elevação da massa vegetal para patamares superiores a 7g, verificada nos Ensaios 2 (7,1133g; 1,1h), 4 (7,1051g; 1,3h) e 6 (8,1026g; 1,1h), induziu a compactação mecânica do leito no interior do cartucho poroso, impondo resistência física à percolação do etanol e restringindo o coeficiente de transferência de massa interfacial (kF) característico do período de taxa de extração constante (CER) (Sovová, 1994; Grijó et al., 2018), o que justifica a acentuada redução de rendimento observada especificamente no Ensaio 2 (2,21%). No que tange à reprodutibilidade das réplicas centrais, constatou-se uma discrepância relevante entre o Ensaio 9 (11,93%) e o Ensaio 10 (20,70%). Esse valor superestimado no Ensaio 10 não refletiu um aumento genuíno na recuperação dos metabólitos secundários, mas sim uma etapa incompleta de desolventização e evaporação no evaporador rotativo, na qual frações de umidade residual e solvente permaneceram retidas no concentrado viscoso final (Nde & Foncha, 2020). Quanto à recuperação do solvente etanólico, o sistema condensador acoplado à rota-evaporação operou com elevada eficiência operacional,

exibindo taxas de recuperação situadas predominantemente na faixa de 70,67% a 92,00%, com destaque para os Ensaios 3 (92,00%) e 5 (89,33%). A ponderação conjunta dessas variáveis consolidou o Ensaio 5 (1,9995g de amostra; 1,2h no Soxhlet) como a condição operacional mais equilibrada e vantajosa do estudo, alcançando 28,79% de rendimento real de extrato e 89,33% de recuperação de álcool, viabilizando o esgotamento fitoquímico com tempo de exposição térmica moderado (Balaji et al., 2014; Nde & Foncha, 2020).

A análise de significância estatística do modelo ajustado para a variável resposta de rendimento mássico percentual foi conduzida por meio da Análise de Variância (ANOVA) e sintetizada no Diagrama de Pareto de efeitos padronizados. A soma quadrática total do sistema alcançou 1165,938 (com 9 graus de liberdade), da qual a soma quadrática residual associada ao erro experimental perfez 260,433 (MS = 65,1083 com 4 graus de liberdade). O termo de maior magnitude e impacto sobre o rendimento foi a interação linear entre a razão sólido/líquido e o tempo de extração (1L by 2L), com soma quadrática de 446,660, Fcalculado = 6,8602 e p = 0,0588, demonstrando um efeito positivo padronizado de +2,6192 no Diagrama de Pareto. Embora este termo tenha ficado marginalmente limítrofe à linha de significância estatística rigorosa de 95% (p = 0,05), ele evidencia uma forte tendência sinérgica entre a carga de biomassa e a duração do refluxo, confirmando que a extensão temporal do ciclo potencializa o rendimento primordialmente quando associada a razões de alimentação favoráveis à transferência de massa interfacial (Nde & Foncha, 2020). O segundo termo mais proeminente consistiu no efeito quadrático da massa de amostra (A(Q)), com soma quadrática de 237,001, Fcalculado = 3,6401, p = 0,1291 e efeito padronizado de +1,9079, corroborando a presença de curvatura no sistema provocada pela transição entre o esgotamento por convecção e o bloqueio difusivo decorrente da sobrecarga de leito (Sovová, 1994). Os efeitos lineares individuais da massa (A(L), efeito padronizado -1,0384, p = 0,3577) e do tempo (B(L), efeito padronizado +0,6541, p = 0,5487), bem como o efeito quadrático do tempo (B(Q), efeito padronizado -0,1888, p = 0,8594), apresentaram valores de F inferiores aos críticos, indicando que a dinâmica extrativa em Soxhlet não responde de maneira puramente isolada a cada variável, mas sim ao acoplamento termodinâmico e hidrodinâmico expresso pela interação entre ambos os fatores (Balaji et al., 2014; Nde & Foncha, 2020).

De forma complementar, a avaliação estatística da taxa de recuperação de álcool (Álcool rec.%) revelou um comportamento independente das variáveis operacionais do leito de extração, com quadrado médio residual de 67,3835 (MSresidual). Conforme ilustrado no respectivo Diagrama de Pareto de efeitos padronizados, nenhum dos fatores principais ou de interação atingiu o limiar de significância estatística ao nível de 95% de confiança (p = 0,05). O efeito linear da massa (A(L)) exibiu a maior contribuição relativa, com efeito padronizado de -0,9788, indicando uma leve tendência de menor recuperação de solvente em cargas elevadas de biomassa em virtude da maior retenção física de líquido nos poros do leito particulado. Os demais termos avaliados — incluindo o efeito quadrático do tempo (B(Q), efeito padronizado -0,5952), o efeito quadrático da massa (A(Q), efeito padronizado +0,3313), o efeito linear do tempo (B(L), efeito padronizado -0,2394) e a interação linear (1L by 2L, efeito padronizado -0,0207) — mantiveram-se amplamente afastados da linha crítica de significância. Esse resultado comprova que a eficiência da etapa de desolventização e condensação é governada predominantemente pela capacidade de troca térmica do evaporador rotativo e pelo controle de vácuo, demonstrando a estabilidade e a robustez do ciclo de

reaproveitamento do etanol sem que variações moderadas de tempo e massa comprometam a sustentabilidade econômica do processo (Nde & Foncha, 2020).

A dinâmica extrativa observada nas folhas de crajiru fundamenta-se na solvatação de seu fitocomplexo polifenólico por meio do etanol 96% P.A., o qual atua solubilizando taninos, flavonoides e 3-desoxiantocianidinas (principalmente a carajurina), metabólitos responsáveis pela intensa pigmentação avermelhada e pelas atividades biológicas cicatrizantes e anti-inflamatórias descritas na etnofarmacologia clássica de suas infusões (Shahidi & Naczk, 1995; Balasundram et al., 2006). A validação dos ciclos térmicos e da transferência de massa nessa matriz modelo viabiliza a transposição metodológica direta para o processamento de inflorescências de Cannabis sativa, uma vez que a temperatura de ebulição do etanol (78ºC) no sistema Soxhlet assegura a extração exaustiva de fitocanabinoides (CBD e Δ9-THC) e terpenos bioativos (como β-cariofileno, α-humuleno) sem provocar a termodegradação acelerada ou oxidação indesejada dos princípios ativos termolábeis (Grijó et al., 2018; Valizadehderakhshan et al., 2021; Moreno-Chamba et al., 2024; Kabdy et al., 2025). Dessa forma, a parametrização estabelecida pelo DCCR em crajiru consolida uma rota analítica reprodutível, de baixo custo e alta eficiência difusiva, pré-requisito indispensável para a padronização e o desenvolvimento de insumos fitoterápicos de elevado grau de pureza farmacotécnica (Grijó et al., 2018; Suárez-Jacobo et al., 2023).

Tabela 3 -Coeficientes de regressão e análise de significância estatística

Tabela 4 -Tabela da Análise de Variância (ANOVA) para o modelo de regressão ajustado

Diagrama 1- Diagrama de pareto para variável de rendimento

Diagrama 2- Diagrama de pareto para variável de álcool recuperado

Conclusão

A parametrização operacional e a modelagem do sistema Soxhlet consolidaram as folhas de crajiru (Arrabidaea chica) como uma matriz vegetal modelo para a padronização cinética de transferência de massa, validação do balanço de solvente e mitigação do estresse térmico sobre metabólitos secundários. Esse protocolo experimental estabeleceu as bases de engenharia de processos requeridas para a transposição segura e eficiente voltada à recuperação exaustiva de fitocanabinoides (CBD e Δ9-THC) e terpenoides a partir de inflorescências de Cannabis sativa.

Para a consolidação desses insumos em escala piloto e industrial, torna-se imprescindível a condução de estudos futuros focados no aprofundamento analítico e na caracterização fitoquímica detalhada das frações obtidas. Recomenda-se o emprego sistemático de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência acoplada a Detector por Arranjo de Diodos e Espectrometria de Massas Sequencial (HPLC-DAD-MS/MS) para a quantificação inequívoca de canabinoides neutros e ácidos, Cromatografia Gasosa

acoplada a Espectrometria de Massas (GC-MS) no modo headspace para elucidação do perfil de terpenos voláteis, Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FT-IR) para monitoramento de grupos funcionais e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) acoplada à Termogravimetria (TG) para determinação da estabilidade térmica e cinética de degradação.

No âmbito farmacêutico geral, os extratos de crajiru (Arrabidaea chica) apresentam elevado potencial para o desenvolvimento de formulações dermatológicas, fitoterápicos tópicos e cicatrizantes, alavancados por sua marcante ação antioxidante, adstringente, gastroprotetora e moduladora de processos inflamatórios decorrente das 3-desoxiantocianidinas (carajurina) e flavonoides.

Em paralelo, o óleo enriquecido com fitocanabinoides e terpenos de Cannabis sativa abre perspectivas clínicas estratégicas aplicadas à realidade da saúde pública regional, destacando-se o contexto do Hospital Estadual Giselda Trigueiro, centro de referência em infectologia e dermatologia sanitária no Rio Grande do Norte. O fitocomplexo canabinoide, associado a terpenos como o β-cariofileno e α-humuleno, desponta como alternativa terapêutica adjuvante no manejo das reações hansênicas, das neurites e da dor neuropática crônica refratária decorrente do dano neural periférico provocado pelo Mycobacterium leprae. A ação imunomoduladora, analgésica e neuroprotetora mediada pelos receptores CB1 e CB2 oferece subsídios para futuros ensaios pré-clínicos e clínicos no hospital, promovendo a reparação tecidual, a regeneração funcional dos nervos e o incremento na qualidade de vida dos pacientes acometidos pela hanseníase.

Referências

ALOO, S. O. et al. Characterization of different hempseed fractions after dehulling and defatting: chemical composition and functional properties. Journal of Food Measurement and Characterization, v. 18, n. 10, p. 7868–7883, 2024.

ANDREO, D.; JORGE, N. Antioxidantes naturais: técnicas de extração. Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, Curitiba, v. 24, n. 2, p. 319–336, 2006.

BALAJI, P.; SANJAY, D.; MUNISH, S. Optimization of oil extraction and characterization from Tamarindus indica linn seed oil. International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering, v. 2, n. 1, p. 1–6, 2014.

BALASUNDRAM, N.; SUNDRAM, K.; SAMMAN, S. Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. Food Chemistry, London, v. 99, n. 1, p. 191–203, 2006.

BUTLER, M. S.; BUSS, A. D. Natural products: the future scaffolds for novel drugs? Biochemical Pharmacology, v. 71, n. 7, p. 919–929, 2006.

GRIJÓ, D. R. Extração de bioativos derivados de Cannabis via fluidos pressurizados. 2018. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

GRIJÓ, D. R.; VIEITEZ OSORIO, I. A.; CARDOZO-FILHO, L. Supercritical extraction strategies using CO_2 and ethanol to obtain cannabinoid compounds from Cannabis hybrid flowers. Journal of CO_2 Utilization, v. 28, p. 174–180, 2018.

KABDY, H. et al. Moroccan Cannabis sativa essential oil attenuates peripheral neuropathic pain induced by chronic sciatic nerve constriction injury in mice. Journal of Ethnopharmacology, v. 343, art. 119486, p. 1–8, 2025.

KELLER, N. P.; TURNER, G.; BENNETT, J. W. Fungal secondary metabolism: from biochemistry to genomics. Nature Reviews Microbiology, v. 3, n. 12, p. 937–947, 2005.

LAZARJANI, M. P. et al. Methods for extraction and processing of medicinal Cannabis sativa L. compounds: A review. Journal of Cannabis Research, v. 3, n. 1, art. 32, 2021.

LI, H. et al. Effect of different extraction methods on the structural analysis, water solubility, and bioactivity of hemp polysaccharides-cannabidiol complexes. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 716, art. 136729, p. 1–8, 2025.

MORENO-CHAMBA, B. et al. Aromatic and cannabinoid profiles of Cannabis inflorescences and seed oils: A comprehensive approach for variety characterization. Industrial Crops and Products, v. 210, art. 118143, p. 1–13, 2024.

NDE, D. B.; FONCHA, A. C. Optimization Methods for the Extraction of Vegetable Oils: A Review. Processes, Basel, v. 8, n. 2, art. 209, p. 1–21, 2020.

PELÁEZ, F. The historical delivery of antibiotics from microbial natural products: new approaches to find new drugs. Biochemical Pharmacology, v. 71, n. 7, p. 981–990, 2006.

SHAHIDI, F.; NACZK, M. Food phenolics: sources, chemistry, effects, and applications. Lancaster: Technomic Publishing, 1995. p. 281–319.

SOVOVÁ, H. Rate of the vegetable oil extraction with supercritical CO_2 — I. Modelling of extraction curves. Chemical Engineering Science, v. 49, n. 3, p. 409–414, 1994.

SUÁREZ-JACOBO, Á. et al. Cannabis Extraction Technologies: Impact of Research and Value Addition in Latin America. Molecules, v. 28, n. 7, art. 2895, p. 1–25, 2023.

TAVARES, C. A. Metabólitos secundários de plantas. Viçosa: Editora UFV, 1999.

VALIZADEHDERAKHSHAN, M. et al. Extraction of Cannabinoids from Cannabis sativa L. (Hemp)—Review. Agriculture, v. 11, n. 5, art. 384, p. 1–21, 2021.

Anexos



Tabela 1



Tabela 2



Tabela 3 -Coeficientes de regressão e análise de significância estatística



Tabela 4 -Tabela da Análise de Variância (ANOVA) para o modelo de regressão ajustado



Diagrama 1- Diagrama de pareto para variável de rendimento



Diagrama 2- Diagrama de pareto para variável de álcool recuperado

CÓDIGO: ET1496

AUTOR: NATHALIA VIEIRA CAVALCANTI

COAUTOR: RENAN DE AQUINO PEREIRA

ORIENTADOR: VICTOR ARAUJO FERRAZ

TÍTULO: Desenvolvimento dos Subsistemas Essenciais do Satélite PotyraSat

Resumo

Este trabalho relata a execução do Plano de Trabalho de Subsistemas Essenciais do projeto PotyraSat, nanossatélite padrão CubeSat 1U de baixo custo, cujos subsistemas de suporte previstos são: Computador de Bordo (OBC), o Suprimento de Energia (EPS), a Determinação e Controle de Atitude (ADCS) e a Estrutura Mecânica. Do conjunto de produtos gerados nas Fases A e B (requisitos, matriz de riscos, OKRs e Revisão de Definição de Missão), o esforço de desenvolvimento na Fase C concentrou-se no OBC e no EPS, culminando na decisão de integrá-los em uma única placa de circuito impresso, motivada pela redução de massa e pelo aproveitamento de volume ocioso no empilhamento 1U para futuras placas. No projeto esquemático da placa em KiCad, usamos o microcontrolador STM32F411CEU6, sensores inerciais e ambientais, watchdog externo independente, e um EPS com conversores buck-boost e boost, carregador com power-path management, fuel gauge e proteção por MOSFETs. Em razão do tempo disponível no ciclo do plano de trabalho, os subsistemas de ADCS e de Estrutura Mecânica não puderam ser desenvolvidos nesta etapa, permanecendo como plano de ação futura, com direcionamentos técnicos já definidos a partir do hardware do OBC concluído. O resultado consolida uma arquitetura de OBC+EPS pronta para fabricação e testes de qualificação, e estabelece o roteiro de continuidade dos demais subsistemas essenciais da plataforma.

Palavras-chave: Nanossatélite.CubeSat.Aeroespacial.Sistemas Embarcados

TITLE: Development of the PotyraSat Nanosatellite Essential Subsystems

Abstract

This paper reports on the execution of the Essential Subsystems Work Plan for the PotyraSat project: a low-cost, 1U CubeSat-standard nanosatellite featuring an On-Board Computer (OBC), Electrical Power System (EPS), Attitude Determination and Control System (ADCS), and Mechanical Structure. Building upon the outputs from Phases A and B (requirements, risk matrix, OKRs, and Mission Definition Review), the Phase C development effort focused on the OBC and EPS. This culminated in a decision to integrate them onto a single printed circuit board (PCB), driven by the need to reduce mass and utilize unused volume within the 1U stack for future boards. The schematic

design in KiCad incorporates the STM32F411CEU6 microcontroller, inertial and environmental sensors, an independent external watchdog, and an EPS featuring buck-boost and boost converters, a charger with power-path management, a fuel gauge, and MOSFET-based protection. Due to time constraints within the work plan cycle, the ADCS and Mechanical Structure subsystems could not be developed at this stage; they remain part of the future action plan, with technical directions already established based on the completed OBC hardware. The result is a manufacturing- and qualification-ready OBC+EPS architecture that establishes a roadmap for the continued development of the platform's remaining essential subsystems.

Keywords: Nanosatellite.CubeSat.Aerospace. Embedded Systems

Introdução

Nos últimos anos, os CubeSats consolidaram-se como plataforma de baixo custo para democratizar o acesso ao espaço, sendo amplamente adotados por universidades para capacitação técnica e pesquisa aplicada. Para um país de dimensões continentais como o Brasil, o desenvolvimento autônomo dessa tecnologia representa também uma via estratégica para o monitoramento territorial e a soberania em infraestrutura espacial.

O projeto PotyraSat, desenvolvido na UFRN, propõe um nanossatélite padrão CubeSat 1U voltado ao sensoriamento remoto dos biomas do Nordeste, com validação por meio de voos de balão de alta altitude e de foguete suborbital, como pode ser visto na Figura 1, servindo simultaneamente como plataforma de formação de estudantes em engenharia aeroespacial.

O desenvolvimento do projeto é organizado em três frentes: a carga útil científica, o sistema de telemetria e os subsistemas essenciais de suporte e operação do satélite. Este trabalho refere-se especificamente ao Plano de Trabalho de Subsistemas Essenciais, cujo objetivo geral é desenvolver, integrar e validar quatro subsistemas: o Computador de Bordo (OBC), o Suprimento de Energia (EPS), a Determinação e Controle de Atitude (ADCS) e a Estrutura Mecânica (MEC). Os produtos já concluídos nas Fases A e B do ciclo de vida do plano, como a Estrutura Analítica do Projeto, que pode ser visto na Figura 2 a primeira camada dela, bem como o registro preliminar de riscos, o ConOps, a matriz de requisitos, os OKRs e a Revisão de Definição de Missão (MDR), estabeleceram a base de engenharia de sistemas sobre a qual o detalhamento de cada subsistema individual é conduzido na Fase C (Design Crítico).

Na Figura 3 pode-se ver a arquitetura definida no MDR, onde o OBC e o EPS foram inicialmente concebidos como placas de circuito impresso independentes, interligadas por um barramento comum, junto aos subsistemas de Comunicação (COMMS) e Carga Útil (PAYLOAD). Ao longo do detalhamento de projeto na Fase C, avaliou-se que essa concepção não aproveitava o volume interno disponível dentro do padrão CubeSat 1U (10x10x10 cm), bem como com a união das duas pode gerar mais espaço para um outro subsistema e/ou placa. Diante disso, o esforço de desenvolvimento do plano de trabalho no período corrente concentrou-se na integração física de OBC e EPS em uma única placa. Em contrapartida, os subsistemas de ADCS e de Estrutura Mecânica, também previstos nos objetivos específicos do plano de trabalho, não puderam ser desenvolvidos

dentro do intervalo de tempo do presente ciclo, permanecendo como plano de ação futura.

O objetivo deste trabalho é, portanto, duplo: (i) apresentar o projeto da placa integrada OBC+EPS, descrevendo os componentes selecionados, os critérios técnicos que fundamentaram essas escolhas e o dimensionamento elétrico realizado para o circuito de carga da bateria; e (ii) reportar o estágio de planejamento do ADCS e da Estrutura Mecânica, com os direcionamentos técnicos definidos para sua execução em continuidade ao plano de trabalho.

Metodologia

O desenvolvimento seguiu o "Método de Desenvolvimento de Tecnologias Aeroespaciais" adotado pelo PotyraSat, que integra três pilares: a Engenharia de Sistemas da NASA, para a decomposição do projeto em partes gerenciáveis; o PMBOK, para o gerenciamento de escopo, tempo, custos e riscos; e elementos de metodologias ágeis, para flexibilidade e interação. O ciclo de vida do projeto pode ser visto na Figura 4 e é estruturado em cinco fases (A a E) com marcos de revisão, aplicadas de forma paralela aos quatro subsistemas essenciais do plano de trabalho (OBC, EPS, ADCS e Estrutura), sendo assim, o trabalho aqui relatado corresponde até a Fase C (Design Crítico), cujo critério de saída é a Revisão Crítica de Design (CDR).

A seleção de componentes seguiu os requisitos gerais definidos na Revisão de Definição de Missão do projeto, onde previa o uso exclusivo de componentes comerciais de prateleira (COTS), manutenção do custo do satélite abaixo de R$ 2.000,00 (dois mil reais), implementação de ao menos um watchdog timer externo e de proteção de energia, e adoção de um Sistema Operacional de Tempo Real (RTOS) com escalonador preemptivo no software embarcado.

Para o núcleo de processamento do OBC, foi selecionado o microcontrolador STM32F411CEU6 (ARM Cortex-M4, 100 MHz, com unidade de ponto flutuante), por seu custo reduzido, disponibilidade comercial, suporte a RTOS e periféricos de comunicação (I2C, SPI, UART, USB) suficientes para gerenciar os demais subsistemas. Complementam o OBC uma memória flash NOR externa (Winbond W25Q32JV, 4MB) para armazenamento não volátil, o sensor inercial de 9 eixos BNO055 (acelerômetro, giroscópio e magnetômetro com fusão sensorial integrada) e o sensor ambiental BME280 (pressão, temperatura e umidade), que fornecem os dados de atitude e altitude barométrica exigidos na matriz de requisitos do projeto. Um microcontrolador auxiliar ATtiny85 foi incluído como watchdog externo independente, com a função de monitorar a atividade do STM32 e reiniciá-lo em caso de travamento, atendendo ao requisito de robustez sem depender exclusivamente do watchdog interno do próprio processador supervisionado.

Para o EPS, a topologia de regulação foi definida a partir da faixa de tensão de uma célula de íon-lítio (aproximadamente 3,0V a 4,2V), que cruza os dois barramentos de tensão necessários. A linha de 5V utiliza o conversor buck-boost TPS63020, capaz de elevar ou abaixar a tensão conforme a carga da bateria varia acima ou abaixo do próprio

setpoint de saída. Já a linha de 3,3V utiliza o conversor boost TPS61230, topologia escolhida por manter a regulação mesmo quando a tensão da bateria cai abaixo de 3,3V ao final da descarga, situação em que um regulador buck convencional deixaria de operar. O carregamento da bateria é gerenciado pelo circuito integrado BQ24075, que implementa power-path management (permitindo alimentar o sistema simultaneamente ao carregamento via USB) e cujos resistores de programação foram dimensionados para uma corrente de carga de 1A (R_ISET calculado pela relação R_ISET = 890/I_alvo) e um limite de corrente de entrada de 1,5A (R_ILIM = 1620/I_alvo). O monitoramento contínuo de tensão, corrente e temperatura da bateria é realizado pelo fuel gauge BQ28Z610 (tecnologia Impedance Track), que também comanda o par de MOSFETs de proteção (CSD17577Q3A) responsáveis pelo isolamento de carga e descarga em condições de falha, com temperatura da bateria monitorada por um termistor NTC dedicado.

A validação nesta fase restringiu-se à revisão de projeto esquemático (design review) e à conferência analítica dos cálculos de dimensionamento dos componentes de programação de corrente; os testes elétricos funcionais em bancada (Flat-Sat) estão previstos para a Fase D, conforme cronograma do projeto.

Resultados e Discussões

Para garantir que este projeto possa se desenvolver de forma madura em termos de engenharia, foi seguido as orientações das principais agências, como a Agência Espacial Europeia (ESA), sobre a produção de documentos que ajudassem a mapear os diversos elementos relacionados ao planejamento, produção, execução e manutenção de um nanossatélite. Alguns exemplos desses documentos foram Estrutura Analítica do Projeto e OKR’s além dos citados anteriormente. Durante este plano de trabalho o principal produto desenvolvido, sendo auxiliado por esses documentos, foi o projeto da placa de circuito impresso OBC+EPS. Desenvolvido em KiCad 10 e sendo feito em duas folhas hierárquicas, compartilhando um mesmo conjunto de conectores de barramento (identificados como H1 e H2, com 20 pinos cada), por onde trafegam os sinais digitais (I2C_SYS, SPI_1, UART_1, UART_2, GPIOs de propósito geral) e as tensões reguladas (+3V3, +5V) para os demais subsistemas do satélite (COMMS e PAYLOAD).

Com essa unificação e a redução de massa e de volume, a eliminação de uma segunda placa de circuito impresso, de seus respectivos conectores de fixação mecânica e de um conjunto adicional de conectores de barramento, representa uma economia direta de massa frente ao orçamento de 400g estabelecido para a estrutura durante o planejamento do projeto, ainda que a quantificação exata depende da fabricação e da pesagem do protótipo. A integração também introduz um risco a ser tratado explicitamente na fase de leiaute, pois a proximidade física entre os conversores chaveados do EPS (TPS63020 e TPS61230, ambos operando em frequências de comutação na faixa de centenas de kHz a poucos MHz) e o barramento sensível do OBC, em especial os sinais SPI da memória flash e do RTC e a alimentação de referência analógica do STM32, aumenta o potencial de acoplamento de ruído, onde esse risco de Interferência Eletromagnética (EMI) já está identificado na matriz de riscos. A mitigação planejada consiste na

segmentação de planos de terra entre a seção de potência e a seção digital, no posicionamento dos indutores de comutação (L4, L5) afastados dos componentes de RF e de referência analógica, e na adoção de capacitores de desacoplamento adequados em cada trilho.

Conclusão

O esforço de desenvolvimento do presente ciclo resultou na consolidação dos subsistemas de Computador de Bordo (OBC) e de Gerenciamento de Energia (EPS) em uma única placa de circuito impresso, decisão coerente com os objetivos de custo e massa estabelecidos no MDR, um benefício não previsto na concepção original da arquitetura em blocos separados. O projeto da placa demonstra que a seleção de componentes COTS é capaz de atender simultaneamente aos requisitos de robustez e de custo definidos para o barramento do satélite, mantendo compatibilidade com os KRs de validação do OBC e do EPS estabelecidos na Revisão de Definição de Projeto, principalmente para este satélite que tem como intuito de ser uma "prova de conceito". Os subsistemas de Determinação e Controle de Atitude (ADCS) e de Estrutura Mecânica, também previstos nos objetivos específicos do plano de trabalho, não puderam ser desenvolvidos dentro do intervalo de tempo do presente ciclo e permanecem como plano de ação futura.

Como trabalhos futuros, destacam-se: (i) a fabricação da placa do OBC+EPS; (ii) os testes de bancada (Flat-Sat) e de qualificação da Fase D para o OBC e o EPS; (iii) o desenvolvimento do software embarcado seguindo os modos de operação planejados. A execução dessas frentes, em conjunto, completará os objetivos específicos do plano de trabalho de subsistemas essenciais do PotyraSat.

Referências

CAL POLY. CubeSat Design Specification, Rev. 14.1. San Luis Obispo: The CubeSat Program, California Polytechnic State University, 2022.

NASA. NASA Systems Engineering Handbook. NASA/SP-2016-6105 Rev2. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 2016.

STMICROELECTRONICS. STM32F411xC/E: ARM Cortex-M4 32-bit MCU. Datasheet, Rev. 8, 2020.

TEXAS INSTRUMENTS. BQ24075: Single-Cell, USB/AC, Li-Ion/Li-Pol Charger with Power-Path Management. Datasheet, SLUS839, 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. BQ28Z610: 1-Series, 2-Series, or 3-Series Li-Ion Battery Fuel Gauge and Protection Solution. Datasheet, SLUSC49, 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. TPS6302x: High-Efficiency Single Inductor Buck-Boost Converter. Datasheet, SLVSAY7, 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. TPS6123x: High-Efficiency, Low-Ripple Boost Converter. Datasheet, SLVSAG3, 2015.

BOSCH SENSORTEC. BNO055: Intelligent 9-axis Absolute Orientation Sensor. Datasheet, Rev. 1.7, 2021.

BOSCH SENSORTEC. BME280: Combined Humidity and Pressure Sensor. Datasheet, Rev. 1.23, 2020.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). 7. ed. Newtown Square: Project Management Institute, 2021.

MARCELINO, G. M.; MORSCH FILHO, E.; MARTINEZ, S. V.; SEMAN, L. O.; BEZERRA, E. A. In-orbit preliminary results from the open-source educational nanosatellite FloripaSat-I. Acta Astronautica, v. 188, p. 64-80, 2021.

MARIANO, M. G. et al. Qualification and validation test methodology of the open-source CubeSat FloripaSat-I. Journal of Systems Engineering and Electronics, v. 31, n. 6, p. 1230-1244, 2020.

DE SOUZA, K. V. C. K.; BOUSLIMANI, Y.; GHRIBI, M. Flight Software Development for a CubeSat Application. IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems, v. 3, n. 4, p. 184-196, 2022.

TOORIAN, A.; DIAZ, K.; LEE, S. The CubeSat Approach to Space Access. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2008, Big Sky. Proceedings [...]. Big Sky: IEEE, 2008. p. 1-14.

Anexos



Figura 1 - CONOPS - OBC



Figura 2 - EAP - OBC



Figura 3 - Arquitetura - OBC



Figura 4 - Calendario - OBC

CÓDIGO: ET1497

AUTOR: GABRIELA BARROS DE QUEIROZ

ORIENTADOR: ISABEL CRISTINA DE OLIVEIRA MAGALHAES AMORIM

TÍTULO: ACESSIBILIDADE AO TRANSPORTE PÚBLICO E ABANDONO ESCOLAR: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS ZONAS ADMINISTRATIVAS DE NATAL/RN

Resumo

Este estudo analisa a relação entre a oferta de transporte público e o abandono escolar em 144 escolas públicas de Educação Infantil e Ensino Fundamental de Natal/RN, considerando as zonas Norte, Sul, Leste e Oeste. A pesquisa emprega análise espacial em Sistema de Informação Geográfica (SIG) e estatística descritiva e correlacional. Na escala microterritorial, foram delimitados buffers de 250 metros no entorno das escolas. Verificou-se que 137 escolas (95,1%) possuem ao menos uma parada nesse raio, enquanto 7 (4,9%) não apresentam cobertura imediata. Nenhuma das escolas sem parada próxima apresentou taxa média de abandono superior a 6%, indicando que a ausência de cobertura imediata, isoladamente, não explica as maiores taxas observadas. Na escala macroterritorial, calculou-se o Índice de Oferta de Transporte por Escola (IOTE), relacionando o número de paradas ao número de escolas por zona, e comparou-se esse indicador à proporção de escolas com abandono superior a 6% entre 2020 e 2024. Observou-se associação negativa entre os indicadores (Pearson $r = -0,7973$; Spearman $\rho = -0,8000$), sugerindo maior abandono nas zonas com menor oferta relativa de transporte. Contudo, a correlação não foi estatisticamente significativa ($p > 0,05$), devido ao número reduzido de unidades territoriais analisadas. Os resultados indicam que a acessibilidade ao transporte deve ser avaliada considerando tanto a proximidade das paradas quanto as desigualdades territoriais na oferta.

Palavras-chave: Mobilidade Escolar.Abandono Escolar. Transporte Público. SIG.

TITLE: PUBLIC TRANSPORT ACCESSIBILITY AND SCHOOL DROPOUT: A COMPARATIVE ANALYSIS AMONG THE ADMINISTRATIVE ZONES OF NATAL, BRAZIL

Abstract

This study analyzes the relationship between public transportation availability and school dropout rates in 144 public Early Childhood and Elementary Education schools in Natal, Brazil, considering the North, South, East, and West administrative zones. The research employs Geographic Information System (GIS) spatial analysis and descriptive and correlational statistics. At the microterritorial scale, 250-meter buffers were established around schools. Results showed that 137 schools (95.1%) have at least one bus stop within this radius, while 7 (4.9%) have no immediate coverage. None of the schools without nearby bus stops had an average dropout rate above 6%, indicating that the absence of immediate coverage alone does not explain the highest dropout rates. At the macroterritorial scale, the Transportation Supply Index per School (IOTE) was calculated by relating the number of bus stops to the number of schools in each zone and compared with the proportion of schools with dropout rates above 6% from 2020 to 2024. A negative association was observed (Pearson $r = -0.7973$; Spearman $\rho = -0.8000$), suggesting higher dropout rates in zones with lower relative transportation supply. However, the correlation was not statistically significant ($p > 0.05$), due to the small number of territorial units analyzed. The findings indicate that transportation accessibility should be assessed considering both bus stop proximity and territorial inequalities in service provision.

Keywords: chool Mobility. School Dropout. Public Transportation. GIS.

Introdução

Garantir o direito à educação básica pública de qualidade envolve não apenas a oferta de vagas, mas também condições que possibilitem o acesso e a permanência dos estudantes na escola. A Constituição Federal de 1988 e a Lei nº 9.394/1996 (LDB) estabelecem a igualdade de condições para o acesso e a permanência na escola, enquanto a Lei nº 12.587/2012, que institui a Política Nacional de Mobilidade Urbana, estabelece a acessibilidade universal e a equidade no acesso ao transporte público coletivo (BRASIL, 1988; BRASIL, 1996; BRASIL, 2012). Nesse contexto, a mobilidade cotidiana dos estudantes constitui uma dimensão relevante da experiência escolar, especialmente em cidades marcadas por desigualdades territoriais nas condições de deslocamento e na distribuição de serviços públicos (LIMA; FREIRE; OJIMA, 2018).

Em Natal/RN, diferenças históricas no processo de urbanização contribuíram para a formação de áreas com distintas condições de infraestrutura e atendimento público. Estudos apontam que desigualdades socioespaciais na distribuição de equipamentos e serviços podem contribuir para trajetórias educacionais diferenciadas, sobretudo quando as condições de deslocamento dificultam o acesso cotidiano às escolas (GOMES; MELO, 2021). Nesse sentido, a oferta e a distribuição territorial do transporte público constituem elementos relevantes para compreender as condições de acesso e permanência escolar.

É importante distinguir abandono e evasão escolar. Enquanto a evasão está relacionada à não rematrícula do estudante no período letivo seguinte, o abandono ocorre quando o aluno deixa de frequentar as aulas durante o ano letivo, após a data de referência utilizada pelo Censo Escolar (QUEIROZ et al., 2026). Essa distinção é relevante porque

o abandono pode refletir dificuldades vivenciadas durante o próprio período letivo, incluindo aquelas relacionadas ao deslocamento entre residência e escola. No âmbito municipal, a Lei nº 8.089/2026 estabeleceu benefícios tarifários no Sistema de Transporte Público de Passageiros de Natal, incluindo medidas direcionadas aos estudantes da rede pública, reforçando a relevância da mobilidade no acesso à educação.

Embora estudos anteriores tenham abordado mobilidade cotidiana e desigualdades socioespaciais em Natal (LIMA; FREIRE; OJIMA, 2018; GOMES; MELO, 2021), permanece relevante investigar a relação entre a distribuição territorial do transporte público e o abandono escolar em diferentes escalas intraurbanas. A proximidade das escolas às paradas, isoladamente, pode não revelar desigualdades na oferta de transporte entre as áreas da cidade.

Diante disso, este estudo tem como objetivo analisar a associação entre a distribuição espacial do transporte público e o abandono escolar nas quatro zonas administrativas de Natal — Norte, Sul, Leste e Oeste. Para isso, combina uma análise microterritorial, baseada na proximidade das escolas às paradas de ônibus em um raio de 250 metros, e uma análise macroterritorial, baseada na oferta relativa de pontos de parada por escola em cada zona. A faixa de abandono superior a 6%, definida a partir da distribuição observada na própria amostra, é utilizada como indicador relativo de maiores taxas de abandono. Busca-se, assim, identificar padrões territoriais de associação entre oferta de transporte e abandono escolar, sem estabelecer relação causal direta entre os fenômenos.

Metodologia

Caracterização da pesquisa e área de estudo

A pesquisa caracteriza-se como quantitativa, de natureza aplicada e caráter exploratório, combinando técnicas de geoprocessamento e análise estatística descritiva e correlacional. O estudo foi desenvolvido no município de Natal/RN, considerando suas quatro zonas administrativas: Norte, Sul, Leste e Oeste. A amostra é composta por 144 escolas públicas de Educação Infantil e Ensino Fundamental localizadas no perímetro urbano do município, correspondentes à base amostral utilizada por Queiroz et al. (2026).

Base de dados

Os dados das escolas foram obtidos no Catálogo de Escolas do Ministério da Educação (MEC/INEP, 2020). As informações referentes ao transporte público coletivo foram fornecidas pela Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana de Natal (STTU, 2022), totalizando 1.931 pontos de parada georreferenciados. Os dados populacionais e a delimitação territorial das zonas administrativas foram obtidos do Censo Demográfico 2022 (IBGE), consolidados segundo os bairros do município. As taxas médias de abandono escolar entre 2020 e 2024 foram fornecidas pela Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e do Lazer do Rio Grande do Norte (SEEC/RN). Para fins

comparativos, adotou-se o ponto de corte de 6%, definido a partir da distribuição observada na própria amostra, como indicador relativo de maiores taxas de abandono.

Análise espacial

As análises foram realizadas no software QGIS, com a espacialização das 144 escolas, dos 1.931 pontos de parada e das quatro zonas administrativas. Para avaliar a proximidade entre escolas e pontos de parada, foi aplicado um buffer euclidiano de 250 metros no entorno das instituições de ensino. O raio foi adotado como critério operacional de proximidade imediata, considerando estudos anteriores de acessibilidade ao transporte público, como Costa e Morais (2014), que utilizaram 300 metros em Natal/RN. Ressalta-se que o buffer representa distância em linha reta e não necessariamente o percurso efetivamente realizado pelos estudantes, o qual pode ser influenciado pela rede viária, barreiras físicas e condições de circulação de pedestres.

Posteriormente, escolas, pontos de parada e dados populacionais foram agregados por zona administrativa, permitindo a comparação territorial entre as quatro regiões.

Indicadores

Foi desenvolvido o Índice de Oferta de Transporte por Escola (IOTE), definido pela razão entre o número de pontos de parada e o número de escolas públicas de cada zona:

$$IOTE = P/E$$

em que P corresponde ao número de pontos de parada e E ao número de escolas públicas da respectiva zona. O indicador expressa a oferta média de pontos de parada por escola, possibilitando comparar territórios com diferentes quantidades de unidades escolares.

Também foi calculada, para cada zona administrativa, a proporção de escolas com taxa média de abandono superior a 6%, permitindo identificar a concentração relativa das escolas com maiores valores de abandono no conjunto analisado.

Análise estatística

A associação entre o IOTE e a proporção de escolas com abandono superior a 6% foi avaliada pelos coeficientes de correlação de Pearson (r) e Spearman (ρ). Pearson foi utilizado para avaliar a associação linear, enquanto Spearman avaliou a associação monotônica de forma não paramétrica (SCHOBER; BOER; SCHWARTE, 2018). Adotou-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

As correlações foram calculadas considerando as quatro zonas administrativas como unidades de análise. Em razão do reduzido número de observações, os resultados foram interpretados de forma exploratória e descritiva, sendo utilizados para identificar a direção e a intensidade das tendências territoriais, sem estabelecer relação causal entre oferta de transporte e abandono escolar. Os coeficientes obtidos foram $r = -0,7973$ para Pearson e $\rho = -0,8000$ para Spearman, com $p = 0,203$ e $p = 0,200$, respectivamente.

Resultados e Discussões

Caracterização espacial das escolas e das paradas de transporte público

A análise espacial permitiu observar a distribuição das escolas públicas e dos pontos de parada de ônibus nas quatro zonas administrativas de Natal/RN. Conforme apresentado no Mapa 1 do Anexo, existem diferenças na quantidade e na distribuição territorial desses equipamentos.

A Zona Norte concentra o maior número de escolas, com 49 unidades, e também o maior número absoluto de pontos de parada, totalizando 712. A Zona Sul possui 32 escolas e 497 paradas, enquanto as Zonas Oeste e Leste apresentam, respectivamente, 35 escolas e 467 paradas e 28 escolas e 255 paradas. Esses valores demonstram que o número absoluto de pontos de parada deve ser analisado conjuntamente com a quantidade de escolas existentes em cada zona, uma vez que regiões com maior número de unidades escolares tendem a apresentar também maior quantidade de infraestrutura de transporte.

A distribuição espacial evidencia, portanto, que a quantidade absoluta de paradas não é suficiente para caracterizar a oferta de transporte entre os territórios. Uma zona pode apresentar maior número de pontos simplesmente em razão de possuir maior quantidade de escolas. Por esse motivo, a análise foi complementada por um indicador relativo, o Índice de Oferta de Transporte por Escola (IOTE), permitindo comparar a disponibilidade de pontos de parada entre regiões com diferentes números de unidades educacionais.

Cobertura imediata das escolas por paradas de ônibus

Para avaliar a proximidade espacial entre as escolas e os pontos de transporte público, foram utilizados buffers de 250 metros no entorno de cada unidade escolar. O Mapa 2 do Anexo apresenta a distribuição das escolas segundo a presença ou ausência de pelo menos uma parada de ônibus dentro do raio estabelecido.

Das 144 escolas analisadas, 137 (95,1%) possuem pelo menos uma parada de ônibus dentro de 250 metros, enquanto 7 (4,9%) não apresentam nenhum ponto de parada nesse raio. As sete escolas estão distribuídas entre as Zonas Norte, Leste e Sul, sendo três na Zona Norte, três na Zona Leste e uma na Zona Sul. Não foram identificadas escolas sem parada no raio analisado na Zona Oeste.

O elevado percentual de escolas com cobertura imediata indica que, considerando exclusivamente a distância euclidiana adotada, a infraestrutura de transporte apresenta ampla presença no entorno das unidades escolares. Entretanto, a existência de uma parada próxima não significa necessariamente que o serviço ofereça condições equivalentes de acessibilidade, frequência, capacidade ou conectividade para os estudantes.

A comparação com as taxas de abandono evidencia um resultado relevante. Nenhuma das sete escolas sem parada dentro do raio de 250 metros pertence à faixa de abandono superior a 6%. Em contrapartida, todas as 18 escolas classificadas nessa faixa possuem pelo menos uma parada dentro do raio analisado. Assim, não foi identificada, na amostra, correspondência direta entre a ausência de parada no entorno imediato e as maiores taxas de abandono.

Esse resultado demonstra que a simples proximidade física entre escola e parada não é suficiente para explicar as diferenças observadas no abandono escolar. A presença de uma parada pode representar apenas a existência física da infraestrutura, sem considerar aspectos como frequência das linhas, número de itinerários, tempo de espera, lotação, integração entre linhas, custo da viagem e condições de acesso a pé.

Além disso, o buffer de 250 metros representa uma distância linear, e não o percurso efetivamente realizado pelos estudantes. A distância real pode ser ampliada pela configuração da rede viária, barreiras físicas, travessias, condições das calçadas e outros obstáculos à circulação de pedestres. Portanto, o resultado deve ser interpretado como uma medida de proximidade espacial imediata, e não como uma medida completa de acessibilidade ao transporte público.

Análise comparativa por zona administrativa

Quando os dados são agregados por zona administrativa, tornam-se mais evidentes as diferenças relativas na oferta de transporte. Os principais indicadores utilizados na comparação estão apresentados na Tabela 1 do Anexo.

A Zona Norte possui 49 escolas e 712 pontos de parada, enquanto a Zona Sul possui 32 escolas e 497 paradas. A Zona Oeste apresenta 35 escolas e 467 paradas, e a Zona Leste possui 28 escolas e 255 paradas. Considerando a relação entre pontos de parada e escolas, observa-se uma diferença mais clara na oferta relativa de infraestrutura.

A Zona Sul apresenta o maior IOTE, com 15,53 pontos de parada por escola, seguida pelas Zonas Norte, com 14,53, Oeste, com 13,34, e Leste, com 9,11. A Zona Leste apresenta, portanto, a menor oferta relativa de pontos de parada entre as quatro regiões analisadas.

Essa diferença torna-se particularmente relevante quando comparada à distribuição das escolas com taxas médias de abandono superiores a 6%. A Zona Leste possui 5 das 28 escolas nessa condição, correspondendo a 17,86%, a maior proporção entre as quatro zonas. A Zona Oeste apresenta 5 das 35 escolas, ou 14,29%. Na Zona Sul, 4 das 32 escolas correspondem a 12,50%, enquanto a Zona Norte apresenta 4 das 49 escolas, equivalentes a 8,16%, a menor proporção observada.

Os resultados indicam, portanto, uma tendência territorial inversa: as zonas com menor oferta relativa de pontos de parada por escola apresentam maior proporção de escolas com taxas de abandono superiores a 6%. Essa tendência é mais evidente na Zona Leste, que reúne simultaneamente o menor IOTE e a maior proporção de escolas na faixa de abandono analisada.

Relação entre oferta relativa de transporte e abandono escolar

A comparação entre os indicadores evidencia uma diferença importante entre as escalas de análise. Na escala microterritorial, verificou-se que 95,1% das escolas possuem pelo menos uma parada em um raio de 250 metros e que nenhuma das escolas sem cobertura imediata apresenta abandono superior a 6%. Na escala das zonas administrativas, entretanto, observa-se uma associação territorial entre a oferta relativa de pontos de parada e a proporção de escolas com maiores taxas de abandono.

Esse contraste sugere que a presença de uma parada próxima à escola não representa, isoladamente, todas as dimensões da oferta de transporte público. Uma escola pode estar fisicamente próxima de uma parada, mas inserida em uma área cuja disponibilidade relativa de infraestrutura de transporte é menor quando considerada a quantidade de escolas atendidas.

O Mapa 3 do Anexo permite visualizar a distribuição espacial das escolas com taxas de abandono superiores a 6% em relação à oferta relativa de transporte representada pelo IOTE. Observa-se maior concentração proporcional dessas escolas nas Zonas Leste e Oeste, justamente as regiões que apresentam os menores valores de IOTE. Por outro lado, a Zona Norte, que apresenta o segundo maior IOTE, possui a menor proporção de escolas na faixa de abandono analisada.

A distribuição espacial também reforça que as escolas sem parada no raio de 250 metros constituem um grupo diferente daquele formado pelas escolas com maiores taxas de abandono. Dessa maneira, os resultados apontam que proximidade imediata e oferta territorial relativa são dimensões distintas da acessibilidade ao transporte público.

Essa diferença é relevante para a interpretação das desigualdades territoriais. A acessibilidade não depende exclusivamente da distância entre a origem e o ponto de transporte, mas também das características e da disponibilidade do serviço. Assim, indicadores baseados apenas na proximidade espacial podem produzir uma percepção de elevada cobertura sem necessariamente refletir diferenças na oferta efetiva do sistema entre os territórios.

Análise correlacional

Para avaliar quantitativamente a tendência observada entre a oferta relativa de transporte e o abandono escolar, foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson e Spearman, considerando as quatro zonas administrativas como unidades de análise.

O coeficiente de Pearson apresentou $r = -0,7973$, enquanto o coeficiente de Spearman apresentou $\rho = -0,8000$. Ambos os coeficientes possuem sinal negativo e magnitude elevada, indicando, em termos descritivos, uma associação inversa entre o IOTE e a proporção de escolas com taxas de abandono superiores a 6%. Dessa forma, as zonas com menor oferta relativa de pontos de parada por escola tendem a apresentar maior proporção de unidades escolares nessa faixa de abandono.

Entretanto, os resultados não alcançaram significância estatística ao nível de 5%. Para Pearson, foi obtido $p = 0,203$, enquanto para Spearman foi obtido $p = 0,200$. Portanto, não é possível afirmar, com base nesse teste, que exista uma relação estatisticamente comprovada entre a oferta relativa de transporte e o abandono escolar.

A ausência de significância deve ser interpretada considerando o reduzido número de unidades de análise. A correlação foi calculada com apenas quatro observações, correspondentes às zonas Norte, Sul, Leste e Oeste. Esse número limita o poder estatístico dos testes e impede generalizações para outras escalas ou territórios. Dessa forma, os coeficientes devem ser compreendidos como indicadores de uma tendência territorial exploratória, e não como evidência de uma relação estatística consolidada.

Ainda assim, a convergência entre os resultados de Pearson e Spearman é relevante do ponto de vista descritivo, uma vez que ambos apontam praticamente a mesma intensidade e direção de associação. A tendência observada também é coerente com a comparação dos indicadores por zona: a Zona Leste apresenta o menor IOTE (9,11) e a maior proporção de escolas com abandono superior a 6% (17,86%), enquanto a Zona Norte apresenta IOTE de 14,53 e a menor proporção nessa faixa (8,16%).

Esses resultados não permitem estabelecer uma relação causal entre transporte público e abandono escolar. O abandono é um fenômeno multidimensional, influenciado por fatores econômicos, sociais, familiares, pedagógicos, territoriais e institucionais. Nesse sentido, a oferta de transporte deve ser compreendida como uma dimensão potencialmente relacionada às condições de acesso e permanência, mas não como explicação isolada para o fenômeno.

Síntese dos resultados e implicações

Os resultados obtidos demonstram que a relação entre transporte público e abandono escolar varia conforme a escala espacial utilizada. Na escala microterritorial, a cobertura das escolas é elevada: 95,1% das unidades possuem pelo menos uma parada dentro do raio de 250 metros. Além disso, nenhuma das sete escolas sem cobertura imediata apresentou taxa de abandono superior a 6%, indicando que a ausência de uma parada próxima não acompanha, na amostra analisada, as maiores taxas de abandono.

Na escala macroterritorial, entretanto, foram identificadas diferenças na oferta relativa de transporte entre as zonas administrativas. A Zona Leste apresentou o menor IOTE e, simultaneamente, a maior proporção de escolas com abandono superior a 6%, enquanto a Zona Norte apresentou uma das maiores ofertas relativas e a menor proporção de escolas nessa faixa.

A correlação negativa observada entre os indicadores reforça essa tendência, mas sua ausência de significância estatística e o reduzido número de unidades territoriais impedem conclusões generalizáveis ou causais. Assim, os resultados devem ser interpretados como evidência exploratória de um possível padrão territorial que merece investigação em análises futuras com maior número de unidades de observação.

De modo geral, os achados indicam que a avaliação da acessibilidade ao transporte público no contexto educacional não deve considerar apenas a existência de uma parada nas proximidades da escola. A análise territorial da oferta relativa de infraestrutura pode revelar desigualdades que permanecem ocultas quando se utiliza exclusivamente uma medida de distância. Para o planejamento urbano e educacional, essa abordagem pode contribuir para identificar áreas que demandem estudos mais aprofundados sobre frequência das linhas, conectividade, tempo de deslocamento, condições de caminhada e demais características que compõem a acessibilidade efetiva dos estudantes.

Portanto, os resultados sustentam a necessidade de uma abordagem multiescalar para compreender a relação entre mobilidade escolar e abandono, reconhecendo que a presença física da infraestrutura de transporte e sua distribuição territorial são dimensões complementares, mas não equivalentes, da acessibilidade educacional.

Conclusão

Este estudo analisou a relação entre a oferta de transporte público e o abandono escolar em 144 escolas públicas de Educação Infantil e Ensino Fundamental de Natal/RN, considerando as quatro zonas administrativas e diferentes escalas territoriais. Os resultados demonstraram elevada proximidade das escolas às paradas de ônibus: 137 unidades (95,1%) possuem pelo menos uma parada no raio linear de 250 metros, enquanto 7 (4,9%) não apresentam cobertura imediata.

Na escala microterritorial, nenhuma das sete escolas sem parada no raio de 250 metros apresentou taxa média de abandono superior a 6%. Portanto, não foi identificada correspondência direta entre a ausência de uma parada próxima e as maiores taxas de abandono, indicando que a proximidade física da infraestrutura, isoladamente, não explica as diferenças observadas entre as escolas.

Na escala das zonas administrativas, entretanto, foram observadas diferenças na oferta relativa de transporte. A Zona Leste apresentou o menor IOTE (9,11) e a maior proporção de escolas com abandono superior a 6% (17,86%), enquanto a Zona Norte apresentou uma das maiores ofertas relativas (14,53) e a menor proporção nessa faixa (8,16%). Os coeficientes de Pearson ($r = -0,7973$) e Spearman ($\rho = -0,8000$) indicaram uma tendência negativa entre os indicadores. Contudo, os resultados não foram estatisticamente significativos a 5% ($p = 0,203$ e $p = 0,200$), em razão, sobretudo, do reduzido número de unidades territoriais analisadas. Assim, a associação deve ser interpretada como uma tendência exploratória, não permitindo estabelecer relação causal.

O principal achado está no contraste entre as escalas: enquanto a análise no entorno das escolas revelou elevada homogeneidade quanto à presença de paradas, a análise por zona evidenciou desigualdades na oferta relativa de transporte que acompanham diferentes concentrações de escolas com maiores taxas de abandono. Isso demonstra que a acessibilidade não deve ser avaliada apenas pela presença de uma parada próxima, mas também pela distribuição territorial e pelas características do serviço.

Como limitações, destaca-se que o IOTE considera apenas a quantidade de paradas por escola, não incorporando frequência das linhas, tempo de espera, itinerários, integração, tempo de viagem ou condições dos trajetos a pé. Além disso, a correlação baseada em apenas quatro zonas restringe a generalização dos resultados. Estudos futuros devem ampliar a análise para escalas menores e incorporar variáveis socioeconômicas e operacionais do transporte. Os achados, portanto, não indicam que o transporte público determine o abandono escolar, mas sugerem que desigualdades territoriais na oferta de transporte constituem uma dimensão relevante a ser considerada no planejamento integrado das políticas de mobilidade e educação em Natal/RN.

Referências

BASTOS, D. A. M. Entre distâncias e aprendizagens: Impactos da mobilidade escolar no desenvolvimento educacional em contextos rurais e urbanos. Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences, v. 8, n. 3, p. 758–772, 2026.

BRASIL. Ministério da Educação. Catálogo de Escolas. Brasília, DF: MEC, 2020.

BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Brasília, DF: Presidência da República, 2012.

CARVALHO, J. P.; DELGADO, J. P. M. Análise espacial dos parâmetros de acessibilidade dos serviços de educação fundamental: criação de mapas de área de abrangência a partir dos dados do Censo Educacional. In: Anais do XXXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Rio de Janeiro: ANPET, p. 3244–3255, 2019.

CLEMENTINO, M. L. M. Complexidade de uma urbanização periférica. Tese (Doutorado em Economia) – Instituto de Economia, UNICAMP, Campinas, 1990.

COSTA, L. P.; MORAIS, I. R. D. Espaço, iniquidade e transporte público: avaliação da acessibilidade urbana na cidade de Natal/RN por meio de indicadores de sustentabilidade. Sociedade & Natureza, Uberlândia, v. 26, n. 2, p. 237–251, 2014

GOMES, S.; MELO, F. Y. M. Por uma abordagem espacial na gestão de políticas educacionais: equidade para superar desigualdades. Educação & Sociedade, Campinas, v. 42, e234175, 2021. DOI: 10.1590/ES.234175.

LIMA, W. M.; FREIRE, F. H. M. A.; OJIMA, R. Mobilidade e rendimento escolar dos estudantes de ensino médio em Natal (RN, Brasil). urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 346–356, 2018. DOI: 10.1590/2175-3369.010.002.AO13.

MEDEIROS, S. R. F. Q. Segregação e gentrificação: os conjuntos habitacionais de Natal. Natal: EDUFRN, 2018.

NATAL. Lei Municipal nº 8.089, de 15 de abril de 2026. Institui o regime jurídico dos benefícios tarifários no âmbito do Sistema de Transporte Público de Passageiros (STPP) do Município do Natal. Diário Oficial do Município (DOM), Natal, 17 abr. 2026.

NATAL. Emenda Modificativa ao Projeto de Lei nº 244/2026. Proponente: Vereadora Brisa Bracchi. Natal: Câmara Municipal de Natal, 09 de abril de 2026.

QUEIROZ, G. B.; SILVA, K.; ARAÚJO, I. S. C.; RABAY, L.; MAGALHÃES, I. Cobertura espacial do transporte público e abandono escolar: uma análise geoespacial em escolas públicas de Natal/RN. In: Anais do XXXIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Rio de Janeiro: ANPET, 2026.

SAMPAIO, M. A. S.; SAMPAIO, M. O. S.; ARAUJO, J. A. Efeitos do Programa Nacional de Apoio ao Transporte Escolar sobre os estabelecimentos rurais de educação infantil. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 62, n. 4, e278422, 2024. DOI: 10.1590/1806-9479.2023.278422.

SARAIVA, M.; FERNANDES, A.; LIMA, R. Transporte urbano e insuficiência de acesso a escolas no Brasil. Brasília: IPEA, 2023.

SCHOBER, P.; BOER, C.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. Anesthesia & Analgesia, v. 126, n. 5, p. 1763–1768, 2018. DOI: 10.1213/ANE.0000000000002864

Anexos



Mapa 1



Mapa 2



Tabela 1



Mapa 2

CÓDIGO: ET1511

AUTOR: MARIA VITÓRIA CAMPOS DA SILVA

ORIENTADOR: FERNANDA BARRETO DE ALMEIDA ROCHA MARIZ

TÍTULO: Redução de desperdícios por meio de ferramentas lean e mapeamento de processos em laboratório de análises clínicas

Resumo

A gestão de materiais em unidades de coleta de exames laboratoriais envolve atividades interdependentes que precisam estar organizadas para garantir a disponibilidade dos insumos. Este estudo teve como objetivo mapear e analisar os processos de recebimento, armazenamento e retirada de materiais em uma unidade de coleta, identificando pontos críticos para subsidiar a estruturação da gestão centralizada de estoques. A pesquisa é aplicada, qualitativa, descritivo-exploratória, desenvolvida por meio de estudo de caso. A coleta de dados ocorreu mediante observação direta, entrevistas semiestruturadas e análise de registros internos. O processo foi representado por fluxograma e complementado pelo diagrama de spaghetti para análise da movimentação física. O mapeamento evidenciou que a ausência de endereçamento fixo no armazenamento dificulta a localização dos materiais, gerando buscas sucessivas, retrabalho e movimentações desnecessárias. Também foram identificadas dificuldades no registro das movimentações e na disposição física dos itens. A análise permitiu identificar oportunidades de melhoria relacionadas ao endereçamento, à gestão visual, à padronização dos fluxos e à digitalização dos registros. Conclui-se que o mapeamento possibilitou compreender as relações entre as etapas do processo e forneceu subsídios para a estruturação da gestão centralizada de estoques.

Palavras-chave: Mapeamento de processos. Gestão de estoques. Lean Healthcare.

TITLE: Reducing Waste through Lean Tools and Process Mapping in a Clinical Analysis Laboratory

Abstract

Material management in clinical laboratory collection units involves interdependent activities that must be organized to ensure the availability of supplies. This study aimed to map and analyze the processes of receiving, storing, and withdrawing materials in a collection unit, identifying critical points to support the structuring of centralized

inventory management. The research is applied, qualitative, descriptive-exploratory, and conducted as a case study. Data were collected through direct observation, semi-structured interviews, and analysis of internal records. The process was represented by a flowchart and complemented by a spaghetti diagram to analyze physical movement. The mapping showed that the absence of fixed addressing in storage makes material location difficult, generating repeated searches, rework, and unnecessary movements. Difficulties in recording material movements and organizing items were also identified. The analysis indicated improvement opportunities related to addressing, visual management, flow standardization, and digitalization of records. It is concluded that process mapping enabled an understanding of the relationships between process stages and provided support for structuring centralized inventory management.

Keywords: Process mapping. Inventory management. Lean Healthcare.

Introdução

A gestão de materiais é essencial para o funcionamento de organizações de saúde, pois a disponibilidade dos insumos influencia a continuidade das atividades (Slack et al., 2018). Em unidades de coleta de exames laboratoriais, o fluxo de materiais envolve recebimento, conferência, armazenamento, localização, retirada e registro, de modo que falhas em uma etapa podem afetar as seguintes.

Nesse contexto, a gestão por processos permite compreender as atividades de forma integrada. O mapeamento possibilita representar a sequência do trabalho, os pontos de decisão e as relações entre as etapas, contribuindo para identificar retrabalho, movimentações desnecessárias e dificuldades operacionais. A abordagem Lean também auxilia na identificação de atividades que não agregam valor e de desperdícios presentes no fluxo (Liker, 2021).

No caso estudado, a centralização dos estoques concentrou os materiais utilizados pela unidade em um espaço específico. Entretanto, a concentração física dos itens não foi acompanhada inicialmente por critérios suficientes de organização e localização. Durante o acompanhamento, foram observadas ausência de endereçamento fixo, buscas sucessivas para localização de materiais, dificuldades na disposição dos itens e inconsistências nos registros de retirada. Esses problemas indicaram a necessidade de compreender como as etapas do processo se relacionavam.

Diante disso, este estudo teve como objetivo mapear e analisar os processos de recebimento, armazenamento e retirada de materiais em uma unidade de coleta de exames laboratoriais, identificando pontos críticos e oportunidades de melhoria para subsidiar a estruturação da gestão centralizada de estoques. A contribuição do estudo está no uso do mapeamento como instrumento de diagnóstico, permitindo relacionar problemas observados em diferentes etapas e orientar propostas de organização dos processos.

Metodologia

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem qualitativa e de caráter descritivo e exploratório. Quanto aos procedimentos técnicos, foi desenvolvida como estudo de caso, permitindo analisar os processos de gestão de materiais em seu contexto real.

O estudo foi realizado no almoxarifado de uma unidade matriz de uma rede de laboratórios de análises clínicas localizada em Natal/RN. O setor é destinado à guarda e distribuição de materiais utilizados nas atividades da unidade, incluindo materiais de coleta, itens de copa, materiais de expediente, produtos de limpeza e insumos destinados ao atendimento de pacientes infantis.

A pesquisa de campo ocorreu em etapas. As primeiras visitas foram realizadas em dezembro de 2024, durante aproximadamente duas semanas, para contato inicial e observação das rotinas. Em agosto de 2025, foi realizada visita para execução de inventário. Entre o final de outubro e o início de novembro de 2025, ocorreram três visitas à unidade e ao almoxarifado central da empresa, para obtenção de informações sobre materiais e mobiliário. Posteriormente, foram realizadas visitas semanais ao almoxarifado, possibilitando acompanhar a rotina operacional.

A coleta de dados utilizou observação direta, entrevistas semiestruturadas e análise de registros internos. A observação permitiu acompanhar o recebimento, armazenamento, localização, retirada e registro dos materiais, além dos deslocamentos realizados. As entrevistas envolveram colaboradores com diferentes funções no processo, incluindo responsáveis pelo transporte, recepcionistas, técnicos de coleta e a gerente da unidade. Também foram consultadas planilhas utilizadas para controle das movimentações.

Com base nas informações coletadas, foi elaborado um fluxograma contendo as principais etapas do processo e seus pontos de decisão. O diagrama de spaghetti foi utilizado como complemento para representar os deslocamentos físicos durante a retirada dos materiais. As duas ferramentas permitiram analisar, respectivamente, o fluxo das atividades e a movimentação no espaço.

Os pontos críticos foram analisados considerando sua relação entre as etapas e associados, de forma complementar, às categorias de desperdícios do Lean, especialmente movimentação, processamento inadequado, estoque e defeitos. As propostas de melhoria foram formuladas a partir dos problemas efetivamente observados e diferenciadas entre ações implementadas e propostas ainda não implementadas.

Resultados e Discussões

1. Caracterização do problema e do funcionamento

O almoxarifado estudado passou por um processo de centralização dos estoques, anteriormente distribuídos entre diferentes setores. A centralização concentrou os materiais em um espaço específico, composto por armários suspensos, bancadas, caixas e uma estante de chão, conforme a figura 4. Embora essa configuração tenha reunido os insumos em um único local, foram observadas limitações relacionadas ao espaço disponível e, principalmente, à organização dos itens.

A análise do funcionamento mostrou que a centralização física não foi inicialmente acompanhada por uma estrutura equivalente de organização. Os materiais eram dispostos conforme a disponibilidade de espaço, sem critérios padronizados para definir a localização de cada item. Dessa forma, materiais de categorias distintas podiam permanecer próximos, enquanto itens utilizados em atividades relacionadas encontravam-se separados. Consequentemente, a localização dos materiais dependia, em parte, do conhecimento prévio dos colaboradores.

Também foram observadas divergências entre as quantidades registradas e os materiais efetivamente disponíveis. Essa diferença compromete a confiabilidade das informações de estoque e pode dificultar decisões relacionadas à reposição. O achado demonstra que a gestão centralizada depende não apenas da concentração física dos materiais, mas também da organização do espaço e da qualidade dos registros.

2. Mapeamento do processo

A partir das observações realizadas e das entrevistas semiestruturadas, foi elaborado o fluxograma do processo de recebimento, armazenamento e retirada de materiais, apresentado na Figura 5. O processo inicia-se com o recebimento e a conferência dos materiais, seguidos pelo armazenamento. Na etapa de retirada, o colaborador precisa localizar o item solicitado, retirá-lo e realizar o respectivo registro.

O mapeamento evidenciou que a ausência de endereçamento fixo cria um ponto de decisão durante a busca pelo material. Quando o item não é localizado, o fluxo retorna à busca, exigindo novas tentativas antes que a retirada seja concluída. Esse retorno representa uma situação de retrabalho e evidencia uma relação entre as etapas de armazenamento e retirada.

Dessa forma, uma dificuldade identificada na retirada tem origem na etapa anterior de armazenamento. A sequência esperada seria armazenar, localizar, retirar e registrar; entretanto, no processo observado, podem ocorrer buscas repetidas antes da localização do item. A movimentação adicional, portanto, não decorre exclusivamente da retirada, mas também da necessidade de compensar a ausência de uma referência fixa de localização.

Outro ponto identificado no mapeamento foi a posição do computador utilizado para registrar as retiradas. Localizado ao final da sala, o equipamento exige um deslocamento adicional após a retirada do material. Assim, o fluxo físico do material e o fluxo da informação não se encontram totalmente integrados.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, foi implementado um formulário eletrônico acessado por QR Code na entrada do almoxarifado. A medida facilita o registro das retiradas no próprio ambiente e reduz a dependência do computador fixo. Essa

intervenção atua diretamente sobre uma das dificuldades identificadas no fluxo, embora seus efeitos quantitativos sobre o tempo de retirada e a movimentação ainda não tenham sido mensurados.

3. Identificação e análise dos desperdícios

O diagrama de spaghetti, apresentado na Figura 6, complementou o fluxograma ao representar os deslocamentos realizados pelos colaboradores durante as atividades de retirada. Embora o espaço reduzido limite a ocorrência de grandes distâncias, foram identificados deslocamentos repetitivos e cruzamentos de trajetos. O resultado demonstra que ambientes pequenos também podem apresentar desperdícios de movimentação quando a disposição dos materiais não favorece sua localização.

A ausência de endereçamento fixo mostrou-se diretamente relacionada às buscas sucessivas. Quando o colaborador não encontra determinado item de imediato, precisa percorrer novamente diferentes pontos do almoxarifado, aumentando o esforço necessário para concluir a atividade. Essa condição caracteriza desperdício principalmente relacionado à movimentação, além de representar processamento inadequado pela necessidade de repetição de uma atividade que poderia ocorrer de forma mais direta.

A disposição dos materiais também contribuiu para as ineficiências observadas. A ausência de critérios sistemáticos dificulta a identificação dos itens e não estabelece uma relação clara entre sua localização e sua frequência ou finalidade de uso. Nesse sentido, o problema está relacionado ao gerenciamento do estoque, uma vez que a organização física não favorece o acesso e o controle dos materiais.

As divergências entre os registros e o estoque físico representam outro ponto crítico. Embora estejam relacionadas ao fluxo de informação, essas inconsistências podem gerar necessidade de conferência e correção dos dados, comprometendo a confiabilidade do controle do estoque. O problema evidencia que a melhoria do processo não depende somente da reorganização física, mas também da padronização e confiabilidade das informações.

A utilização do computador ao final da sala constitui ainda um fator adicional de movimentação. Após localizar e retirar o material, o colaborador precisa deslocar-se até o equipamento para efetuar o registro. O formulário eletrônico disponibilizado por QR Code representa uma intervenção sobre essa etapa, ao permitir que o registro seja realizado por dispositivo móvel no próprio ambiente.

A relação entre os principais problemas identificados pode ser sintetizada em uma sequência: ausência de endereçamento, dificuldade de localização, buscas sucessivas, retrabalho e movimentação adicional, seguidos da necessidade de deslocamento para registro e do risco de inconsistências nas informações. Essa relação evidencia que os problemas não são independentes e que intervenções isoladas podem não atuar sobre suas causas.

Os resultados reforçam a importância do mapeamento de processos em ambientes de saúde. No caso analisado, o fluxograma permitiu compreender a sequência das atividades e identificar os pontos de decisão e retrabalho, enquanto o diagrama de

spaghetti evidenciou como as ineficiências se manifestam fisicamente no espaço. A utilização conjunta das ferramentas proporcionou uma visão mais integrada do processo, relacionando as características do fluxo às condições de organização do almoxarifado.

Os achados também estão alinhados aos princípios do Lean Healthcare, especialmente à identificação de atividades que não agregam valor ao processo. A busca repetida por materiais, por exemplo, não acrescenta valor à atividade de abastecimento e consome tempo e esforço do colaborador. Entretanto, não é possível afirmar que houve redução efetiva do tempo ou da movimentação a partir das propostas, pois esses indicadores ainda não foram avaliados após as intervenções.

4. Propostas de melhoria baseadas no Lean

A partir dos pontos críticos identificados no mapeamento e da classificação dos desperdícios, foram identificadas oportunidades de melhoria relacionadas ao endereçamento, à reorganização física, à gestão visual, à padronização do fluxo e ao aprimoramento dos registros.

O estabelecimento de um sistema de endereçamento pode definir posições fixas para os materiais, reduzindo a dependência do conhecimento individual dos colaboradores e eliminando, ou ao menos reduzindo, as buscas sucessivas identificadas no fluxograma. Associada a essa medida, a gestão visual, por meio de etiquetas e sinalização dos espaços, pode facilitar a identificação dos itens e tornar a organização mais intuitiva.

Também foi proposta a reorganização física dos materiais, considerando a proximidade entre itens relacionados e as características de utilização. Essa alteração pode contribuir para reduzir deslocamentos e facilitar o acesso aos materiais durante as retiradas. Para melhorar o aproveitamento do espaço, foram ainda consideradas alternativas de organização e substituição das caixas de papelão por recipientes mais adequados à visualização dos itens.

No fluxo de informações, o formulário eletrônico acessado por QR Code já implementado representa uma medida de melhoria, pois aproxima o registro da atividade de retirada e reduz a necessidade de deslocamento até o computador fixo. A continuidade dessa iniciativa deve ser acompanhada pela padronização dos registros e pelo monitoramento das divergências entre estoque físico e informações registradas.

A centralização dos estoques, portanto, não deve ser compreendida apenas como a concentração física dos materiais em um único espaço. Para produzir maior previsibilidade e eficiência, é necessário estabelecer critérios para armazenamento, localização, retirada e registro. Nesse sentido, o mapeamento realizado fornece uma base para a estruturação desses processos e para a elaboração posterior de procedimentos operacionais padronizados.

Como continuidade do estudo, recomenda-se a implementação das propostas ainda pendentes e o acompanhamento de seus efeitos por meio de indicadores, como tempo de localização dos materiais, número de tentativas de busca, frequência de divergências entre estoque físico e registros e quantidade de movimentações realizadas durante as

retiradas. Dessa forma, será possível verificar empiricamente os efeitos das mudanças e subsidiar o aperfeiçoamento contínuo do processo.

Conclusão

O estudo teve como objetivo mapear e analisar os processos de recebimento, armazenamento e retirada de materiais em uma unidade de coleta de exames laboratoriais, identificando pontos críticos para subsidiar a estruturação da gestão centralizada de estoques.

O mapeamento evidenciou que a ausência de endereçamento fixo no armazenamento dificulta a localização dos materiais e pode gerar buscas sucessivas, retrabalho e movimentações adicionais. Também foram identificadas limitações na disposição física dos itens e no fluxo de registro das retiradas, incluindo divergências entre informações registradas e estoque disponível.

A utilização conjunta do fluxograma e do diagrama de spaghetti permitiu analisar a sequência das atividades e os deslocamentos necessários para sua execução, evidenciando relações entre problemas de diferentes etapas. A partir do diagnóstico, foram identificadas oportunidades de melhoria relacionadas ao endereçamento, à reorganização física, à gestão visual, à padronização dos fluxos e à digitalização dos registros. O formulário eletrônico acessado por QR code foi uma ação implementada durante a pesquisa; as demais propostas ainda dependem de implementação e avaliação.

Conclui-se que o mapeamento de processos contribuiu para compreender o funcionamento do almoxarifado de forma integrada e forneceu subsídios para estruturar a gestão centralizada de estoques. Recomenda-se a implementação das melhorias propostas e o acompanhamento de seus efeitos por indicadores de localização, movimentação e confiabilidade dos registros.

Referências

Liker, Jeffrey K. O modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2021.

Slack, Nigel; Brandon-Jones, Alistair; Johnston, Robert. Administração da produção. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

Anexos



Figura 1 - Disposição física do almoxarifado



Figura 2 - Disposição dos produtos no almoxarifado



Figura 3 - Planilha de registros de retirada de materiais



Figura 4 - Utilização de caixas de papelão para armazenamento



Figura 5 - Fluxograma do processo de recebimento, armazenamento e retirada de materiais do almoxarifado (mapeamento de processos)



Figura 6 - Diagrama de Spaghetti da movimentação dos colaboradores no almoxarifado

CÓDIGO: ET1513

AUTOR: KAWAN VINICIUS FEITOSA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: VICTOR ARAUJO FERRAZ

TÍTULO: Desenvolvimento da Carga Útil do Satélite PotyraSat

Resumo

Este trabalho descreve o desenvolvimento e a validação arquitetural de hardware e firmware da carga útil (Payload) do PotyraSat, um nanossatélite padrão CubeSat 1U focado no imageamento remoto de biomas do Nordeste brasileiro. Baseando-se nas diretrizes de Engenharia de Sistemas da NASA (até a Fase C - Design Crítico), o projeto adota componentes COTS (Commercial Off-The-Shelf) para assegurar baixo custo, ágil implementação e modularidade. O núcleo de processamento integra um microcomputador Raspberry Pi Zero e um módulo ESP32-P4, estruturados em uma PCB de 96x96 mm projetada no software KiCad. Para contornar a limitação de uma única interface CSI nativa no Pi Zero, implementou-se a multiplexação de duas câmeras de 5MP via chave analógica, exigindo validação de sincronização lógica de hardware. A análise do link de comunicação (projetado em 2 Mbps) estabeleceu o uso de compressão JPEG em resolução Full HD (~900 KB) como ideal, evitando gargalos de I/O e garantindo banda para a telemetria. Em nível de software, a adoção do Linux embarcado mapeou desafios térmicos e restrições de RAM (consumo basal de ~150 MB), fundamentando a migração futura para imagens baseadas em BusyBox no modelo de voo. Conclui-se que a arquitetura proposta é viável e apresenta excelente custo-benefício, estabelecendo a base para testes em formato FlatSat e futuras campanhas de lançamento suborbitais e em balões de alta altitude.

Palavras-chave: CubeSat.Payload.Raspberry Pi.Imageamento Remoto.Sistemas Embarcados

TITLE: Development of the PotyraSat Satellite Payload

Abstract

This work describes the development and architectural validation of the hardware and firmware for the payload of PotyraSat, a 1U CubeSat nanosatellite focused on the

remote imaging of biomes in northeastern Brazil. Based on NASA's Systems Engineering guidelines (up to Phase C - Critical Design), the project adopts COTS (Commercial Off-The-Shelf) components to ensure low cost, agile implementation, and modularity. The processing core integrates a Raspberry Pi Zero microcomputer and an ESP32-P4 module, structured on a 96x96 mm PCB designed using KiCad software. To overcome the limitation of a single native CSI interface on the Pi Zero, the multiplexing of two 5MP cameras via an analog switch was implemented, requiring validation of hardware logic synchronization. The analysis of the communication link (projected at 2 Mbps) established the use of JPEG compression in Full HD resolution (~900 KB) as ideal, avoiding I/O bottlenecks and ensuring bandwidth for telemetry. At the software level, the adoption of embedded Linux mapped thermal challenges and RAM restrictions (a baseline consumption of ~150 MB), justifying the future migration to BusyBox-based images in the flight model. It is concluded that the proposed architecture is viable and presents an excellent cost-benefit ratio, establishing the foundation for FlatSat testing and future suborbital and high-altitude balloon launch campaigns.

Keywords: CubeSat.Payload.Raspberry Pi.Remote Imaging.Embedded Systems

Introdução

Em um mundo cada vez mais aberto a tecnologias New Space, e com o espaço cada dia tendendo mais a uma democratização, os CubeSats aparecem como uma alternativa barata, de fácil e rápida implementação, e baixo custo operacional. O projeto PotyraSat, desenvolvido na UFRN, propõe o desenvolvimento e construção de um nanossatélite padrão CubeSat 1U com validação por meio de voos de balão de alta altitude e de foguete suborbital, servindo, simultaneamente como plataforma de formação de estudantes em engenharia aeroespacial.

O desenvolvimento do projeto é organizado em três frentes: a carga útil científica, o sistema de telemetria e os subsistemas essenciais de suporte e operação do satélite. Este plano de trabalho relata o avanço da frente de carga útil científica, cujo objetivo é o sensoriamento e imageamento remoto voltado aos biomas da região Nordeste.

A metodologia adotada para o desenvolvimento do satélite e da payload baseia-se nas diretrizes de Engenharia de Sistemas da NASA, aliadas a práticas de gerenciamento do PMBOK e a elementos de metodologias ágeis. Na arquitetura do sistema, foi-se optado pelo uso, para unidade central de processamento, o uso de um microcomputador Raspberry Pi Zero. Sua escolha se deu pelo alto poder de processamento, facilidade de integração para as primeiras versões, alta disponibilidade de literatura, bem como a disponibilidade de uma plataforma sólida de desenvolvimento e implementação. Como a placa já possui um conector MIPI CSI-2, combinamos um ESP32-P4 apenas para permitir ser colocada mais de uma câmera na arquitetura, ficando este responsável pelo gerenciamento de um dos sensores devido à seu suporte às câmeras escolhidas para a placa. Foram escolhidas duas câmeras também da Raspberry para serem embarcadas, garantindo compatibilidade de protocolo e excelente custo-benefício.

O objetivo de desenvolvimento deste plano de trabalho então é desenvolver e validar a arquitetura da placa da payload, analisando custos para se manter a proposta de baixo custo, permitindo um desenvolvimento fácil e rápido, que mantenha a proposta de fácil replicabilidade, e a modularização da placa bem como de todo o satélite, permitindo a rápida adaptabilidade do projeto para adequação em diferentes perfis de missões.

Metodologia

A metodologia e construção do projeto e da placa seguiram as diretrizes de Engenharia de Sistemas da NASA, aliadas com as práticas de gerenciamento do PMBOK e a elementos de metodologias ágeis. O fluxo de trabalho aqui foi estruturado em 5 fases (de A à E), com marcos de revisão, sendo assim, o trabalho aqui relatado correspondente até a Fase C (Design Crítico), cujo critério desta fase saída é a Revisão Crítica de Design (CDR).

Durante essas fases, realizou-se o estudo analítico de componentes, focando primariamente na seleção de microcomputadores e microcontroladores. A premissa foi avaliar o limite de redução de custos sem comprometer o poder de processamento ou "inchar" a arquitetura com componentes auxiliares que tornassem a manutenção complexa. A familiaridade e disponibilidade de documentação amigável também foram parâmetros considerados para essa primeira versão da placa e satélite, considerando a velocidade exigida de implementação, debug e desenvolvimento do firmware e integração entre sensores e drivers de funcionamento. Como abordagem para a placa central da arquitetura (o microcomputador Raspberry Pi Zero), optou-se por usar uma abordagem implementando-o como SoM (System on Module), facilitando substituição, testes de bancada com a mesma plataforma “final” de processamento (sem depender de circuitos auxiliares em bancada, que podem dar algum nível de discrepância nos testes), bem como abarcar a ideia de replicabilidade fácil do sistema. O uso, nesta arquitetura inicial, de chips mais complexos, exigiria um maior nível de adaptabilidade no curto e médio prazo, que exigiria maior espaçabilidade entre os testes, implementação, bem como uma pré validação da arquitetura de firmware que ainda não existe tanto dentro do escopo do projeto, quanto na literatura de CubeSats desenvolvidos baseados em COTS (Commercial Off The Shelf). Conseguimos concluir então, que esta arquitetura, é a arquitetura mínima viável para o funcionamento, que permite desenvolvimento rápido sem afetar a funcionalidade, rápida modificabilidade, e velocidade de testes de bancada com FlatSat.

Resultados e Discussões

A elaboração do subsistema de carga útil (Payload) e processamento exigiu a tomada de decisões arquiteturais complexas para equilibrar restrições de espaço, capacidade computacional, consumo energético e largura de banda. Dentro deste plano de trabalho,

discutem-se os resultados da modelagem de hardware, as estratégias de interfaceamento de sensores e as métricas de software embarcado.

O desenvolvimento da placa de circuito impresso (PCB) foi realizado no software KiCad, adotando-se uma estrutura de duas folhas hierárquicas para organizar a complexidade do circuito. O hardware foi restrito a uma área útil de 96x96 mm, dimensões compatíveis com o padrão do projeto e que consideram uma margem segura de borda para a placa de 100x100 mm, onde se encaixam os suportes e parafusos que conectam a placa à estrutura do satélite. A comunicação com os demais subsistemas do satélite (COMMS e PAYLOAD) foi padronizada através de um barramento unificado, utilizando dois conectores (identificados como J1 e J2, com 20 pinos cada). Este barramento concentra o tráfego de sinais digitais (I2C_SYS, SPI_1, UART_1, UART_2, GPIOs de propósito geral) e a distribuição das tensões reguladas (+3V3 e +5V).

O núcleo de processamento baseia-se na integração entre um Raspberry Pi Zero e um módulo ESP32-P4. A escolha por módulos barebone (sem placas de desenvolvimento auxiliares) trouxe desafios de layout. O módulo ESP32-P4, por exemplo, não possui conector FPC nativo, exigindo soldagem direta na PCB customizada e a previsão de conectores MIPI CSI-2 integrados à placa-mãe para o recebimento dos cabos flat das câmeras.

O roteamento das trilhas CSI exigiu atenção rigorosa ao pinout. Observou-se uma divergência de alinhamento físico: enquanto o conector do Raspberry Pi adota a sequência DATA0 → DATA1 → CLK (pinos 2 a 9), o módulo ESP32-P4 expõe CLK → DATA0 → DATA1. Consequentemente, foi necessário projetar o cruzamento das trilhas na PCB. Do ponto de vista de integridade de sinal, esse cruzamento não apresenta degradação, desde que o casamento de impedância e o comprimento isolado de cada par diferencial sejam rigorosamente mantidos. Adicionalmente, o acionamento da câmera exigiu a derivação de sinais extras a partir do ESP32-P4 (pinos 13 a 15 do FPC), alocando-se portas GPIO flexíveis para o barramento I2C (CAM_I2C_SDA e SCL) visando a configuração do sensor (endereçamento, resolução e framerate), além do fornecimento de alimentação de 3,3V. Podemos ver um esboço inicial de como funcionaria a conexão entre componentes na placa no Anexo 1.

Um dos maiores desafios da arquitetura do projeto consistiu na necessidade de operar duas câmeras (Módulo RPi v1.3 Normal e NoIR, ambas com sensor OV5647 de 5MP) utilizando o Raspberry Pi Zero, que oferece suporte nativo a apenas uma interface CSI. Durante o desenvolvimento, três topologias foram avaliadas para contornar essa restrição de hardware. Primeiramente, o uso de Adaptador CSI-USB foi avaliado: A utilização de um módulo conversor foi descartada devido ao alto custo financeiro. Segundamente, o uso simultâneo de Câmera CSI e Câmera USB, visto que esta abordagem resolve o problema de conectividade, porém introduz um viés óptico. Mesmo utilizando sensores idênticos (OV5647), a diferença nas lentes exige um processamento de correção geométrica via software (como transformações de homografia) para alinhar as imagens de forma que "uma sirva de máscara para a outra". Embora viável, essa técnica eleva o custo computacional embarcado. E a terceira e última topologia analisada foi a de multiplexação da interface CSI, cujo adotava o uso do componente SN74CBTLV3257-Q1 (chave analógica 2:1 de 4 canais, qualificada para uso automotivo de 3.3V) para alternar o sinal das duas câmeras na mesma porta

CSI. A escolha pela multiplexação revelou restrições operacionais inerentes. Na prática, impossibilita-se a captura estritamente simultânea. O acionamento da chave analógica pode introduzir delay entre os quadros e risco de corrupção de dados caso a alternância ocorra antes da estabilização elétrica do sensor. Conclui-se que o ganho em homogeneidade de hardware (uso de duas câmeras da mesma família sem interfaces USB) cobra seu preço na complexidade da sincronização lógica, exigindo algoritmos robustos de temporização matemática para mitigar o erro entre as capturas. Podemos visualizar então a lista de componentes estipulada para ser utilizada na construção da placa da Payload no Anexo 2, na lista de componentes (Bill of Materials - BOM) dos componentes propostos para a placa (excluindo, claro, a matéria prima utilizada na fabricação da própria PCB em si).

Durante as fases de missão, o sistema estará sob estresse operacional máximo, o que inclui a captura, processamento e envio de dados para o subsistema de telecomunicações (COMMS/OBC). A modelagem do volume de dados mostrou que o envio de imagens em formato bruto (RAW) é inviável para as taxas de transmissão do projeto. Considerando o padrão de 3 bytes por pixel em imagens coloridas (RGB), analisou-se o peso não comprimido das capturas em diferentes resoluções frente à estimativa de compressão JPEG, que reduz o tamanho do arquivo por um fator médio de 10 a 15 vezes, dependendo da entropia da cena capturada, conforme podemos ver na tabela do Anexo 3.

As análises de enlace com a equipe de telecomunicações do projeto do satélite Potyra indicam uma taxa de transferência projetada na ordem de 2 Mbps. Com base nos dados levantados, o uso de resolução 8MP (~3 MB comprimidos) satura a banda e cria gargalos para a telemetria geral. Dessa forma, conclui-se que operar em resoluções entre HD e Full HD apresenta a melhor relação custo-benefício. O envio de uma imagem Full HD (aprox. 900 KB) deixa uma margem de segurança de rede superior a 1 MB por segundo, espaço mais do que suficiente para garantir a entrega simultânea de pacotes de telemetria geral (estimados em menos de 200 KB). Para evitar gargalos de I/O durante a gravação em disco antes da transmissão, estipulou-se o uso de cartões SD de 32GB (Classe 10 / A1-A2).

A adoção de arquitetura de firmware baseada em Linux embarcado no Raspberry Pi Zero impõe restrições severas de alocação de memória. Do ponto de vista de engenharia de software para ambiente espacial/aeroespacial, a prática padrão dita a compilação de uma imagem Linux customizada (utilizando ferramentas como Buildroot ou Yocto Project baseadas em BusyBox). Essa abordagem garante que apenas o kernel, os drivers fundamentais e a aplicação principal rodem no sistema, eliminando interfaces gráficas e serviços em segundo plano. Contudo, observou-se que durante a fase de prototipagem e calibração de código, compilar uma nova imagem do sistema a cada alteração cria um gargalo no fluxo de desenvolvimento. Optou-se por utilizar o sistema operacional padrão Raspberry Pi OS Lite nas fases de teste, migrando para a arquitetura baseada em BusyBox apenas na entrega do modelo de voo. Esta escolha de sistema operacional, seja na versão de teste ou final, tem um impacto direto no budget de hardware: o kernel Linux consome inevitavelmente entre 120 e 150 MB de memória de forma contínua. Logo, a disponibilidade de memória RAM para os algoritmos de manuseio de imagem cai do valor nominal de 512 MB para aproximadamente 362 MB. Esse comportamento define o principal limite do hardware: o Raspberry Pi Zero atua de forma eficiente como um coletor e despachante de pacotes, porém, operações matemáticas complexas

embarcadas causarão o esgotamento rápido da memória disponível e um potencial aquecimento do SoC (System on a Chip). A dissipação de calor contínua sob regime de estresse de processamento se consolida, portanto, como um dos principais pontos críticos a serem validados nos testes de termovácuo futuros com o protótipo montado.

Conclusão

O esforço deste ciclo de trabalho consolida e atinge os objetivos, validando a arquitetura de hardware da placa, bem como o esboço inicial do funcionamento da arquitetura de firmware de processamento e interação entre os componentes da mesma. Com base no arranjo dos componentes e protocolos de comunicação e interação prevista entre componentes disponíveis para os mesmos, conseguimos construir e desenvolver um sistema modular, com excelente custo-benefício, com poder computacional mais que suficiente para as atividades pensadas, bem como validar o fluxo de funcionamento da placa com os componentes previstos na arquitetura.

Planeja-se então, como trabalhos futuros e evolução natural deste plano de trabalho, a implementação em formato FlatSat para testes de bancada mais rígidos, bem como a integração do subsistema em campanhas de lançamento com balões de alta altitude, permitindo uma primeira coleta de dados do satélite, e obtenção de dados que servirão para análise de evolução natural da arquitetura, funcionamento e missão da Payload e, principalmente, a unidade central de processamento da placa (o Raspberry Pi Zero). Esta, somada às outras frentes do projeto (placas de comunicação e On-Board Computer), em conjunto, completará os objetivos específicos do plano de trabalho de subsistemas essenciais do PotyraSat.

Referências

NASA. (2016). NASA Systems Engineering Handbook (Rev. 2). [Washington, D.C.]: National Aeronautics and Space Administration

Project Management Institute (2021) A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 7th ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute.

Puig-suari, Prof & Turner, Clark & Ahlgren, William. (2001). Development of the standard CubeSat deployer and a CubeSat class PicoSatellite. 1. 1/347 - 1/353 vol.1. 10.1109/AERO.2001.931726.

Gabriel Mariano Marcelino, Edemar Morsch Filho, Sara Vega Martinez, Laio Oriel Seman, Eduardo Augusto Bezerra. In-orbit preliminary results from the open-source educational nanosatellite FloripaSat-I. Acta Astronautica. Volume 188. 2021. Pages 64-80,. ISSN 0094-5765. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.07.001.

M. G. Mariano et al., "Qualification and validation test methodology of the open-source CubeSat FloripaSat-I," in Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 31, no. 6, pp. 1230-1244, Dec. 2020, doi: 10.23919/JSEE.2020.000103.

K. V. C. K. de Souza, Y. Bouslimani and M. Ghribi, "Flight Software Development for a CubeSat Application," in IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems, vol. 3, no. 4, pp. 184-196, Dec. 2022, doi: 10.1109/JMASS.2022.3206713.

Balaji, Preet. Can AI Satellite Embeddings Outperform Traditional Remote Sensing Classification? Medium. Disponível em: https://medium.com/@preet.balaji20/can-ai-satellite-embeddings-outperform-traditional-remote-sensing-classification-4ab2670ba327.

Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi Forums: Topic 194509. Disponível em: https://forums.raspberrypi.com/viewtopic.php?t=194509.

Texas Instruments. SN74CBTLV3257-Q1: Automotive 3.3-V, 2:1 (SPDT), 4-channel analog switch with partial-power-down mode. Datasheet & Product Info. Disponível em: https://www.ti.com/product/SN74CBTLV3257-Q1.

Waveshare. ESP32-P4-Module. Waveshare Wiki. Disponível em: https://www.waveshare.com/wiki/ESP32-P4-Module.

Shimizu, T. et al. (2024). VERTECS: A COTS-based payload interface board to enable high data-rate astronomical imaging on a 6U CubeSat. arXiv preprint arXiv:2406.00935. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2406.00935.

Techavijit, Pirada; Chivapreecha, Sorawat; Sukchalerm, Polkit; Plodpai, Aniwat. (2016). CubeSat image transmission in JPEG compression: An experiment on high altitude platform. 2016 8th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST). Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7440493.

Miller, E. (2022). Space-operating Linux: An Operating System for High Performance AI Computation on Commercial-Grade Equipment in Low Earth Orbit. 36th Annual Small Satellite Conference (SSC22), SSC22-P2-12. Utah State University. Disponível em: https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5437&context=smallsat

Anexos



Anexo 1: Esboço do esquema de conexão entre componentes na placa da Payload do PotyraSat.



Anexo 2: Lista de materiais e componentes (Bill of Materials - BOM) da placa da Payload do PotyraSat.



Anexo 3: Peso das capturas em diferentes resoluções frente à estimativa de compressão JPEG.

CÓDIGO: ET1563

AUTOR: ANA CAROLINA FRANCA NURMBERGER NUNES

ORIENTADOR: ADILSON JOSÉ DE OLIVEIRA

TÍTULO: Reconhecimento de objetos em ambiente fechado utilizando sensor LiDAR associado a um manipulador robótico

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento a laser (LiDAR) para identificação e medição de distância de objetos em ambiente fechado, integrado a um manipulador robótico e sistema de visão por câmera. O objetivo é aumentar a segurança operacional por meio da automação no reconhecimento de obstáculos. A metodologia abrangeu fundamentação teórica, análise de mercado e seleção do sensor RPLiDAR C1 via Matriz de Pugh, caracterização do ambiente no Laboratório de Manufatura (LABMAN/UFRN) e o desenvolvimento de um pipeline de processamento em Raspberry Pi. O algoritmo implementado realiza validação de amostras, organização em bins angulares, filtros de mediana angular e temporal para redução de ruídos de vibração, mapeamento de referência e confirmação de presença por limiar adaptativo e análise temporal. Os resultados demonstraram capacidade de mapeamento 360°, com indicação de ângulo e distância de cada ponto mapeado, além do disparo de alertas diante de alterações no ambiente. O sensor foi integrado ao manipulador para orientá-lo no alinhamento correto do item a ser manipulado. Conclui-se que a solução amplia a confiabilidade em processos automatizados, viabilizando o direcionamento do manipulador robótico para a captura de objetos identificados.

Palavras-chave: LiDAR. Automação industrial. Reconhecimento de objetos. Robótica.

TITLE: Indoor Object Recognition Using a LiDAR Sensor Integrated with a Robotic Manipulator

Abstract

This work presents the development of a laser sensing system (LiDAR) for target identification and distance measurement in indoor environments, integrated with a robotic manipulator and a camera vision system. The goal is to enhance operational safety through automated obstacle recognition. The methodology encompassed theoretical foundations, market analysis, sensor selection (RPLiDAR C1 via Pugh Matrix), environment characterization at the Manufacturing Laboratory (LABMAN/UFRN), and the development of a processing pipeline on a Raspberry Pi. The implemented algorithm performs sample validation, angular binning, angular and temporal median filters for vibration noise reduction, reference mapping, and presence confirmation through adaptive thresholding and temporal analysis. The results demonstrated 360° mapping capability, providing angle and distance indicators for each mapped point, alongside alert triggers upon environmental changes. The sensor was integrated with the manipulator to guide proper item alignment. It is concluded that the solution increases reliability in automated processes, enabling the robotic manipulator to be directed toward capturing identified objects.

Keywords: LiDAR. Industrial automation. Object recognition. Robotics.

Introdução

Historicamente, a segurança e o monitoramento em ambientes operacionais e industriais dependiam diretamente da vigilância e da presença física do operador humano, mantendo o trabalhador na primeira linha de frente perante os riscos inerentes às rotinas fabris. Contudo, a evolução tecnológica impulsiona uma transformação fundamental nesse cenário: a substituição da exposição humana por sistemas automatizados inteligentes, capazes de atuar como mecanismos de proteção ativa e poupar os indivíduos de situações de perigo, fadiga e falhas operacionais.

Nesse contexto de transição, os sistemas de sensoriamento a laser por LiDAR (Light Detection and Ranging) consolidam-se como ferramentas fundamentais para o reconhecimento espacial e o aumento da integridade no ambiente de trabalho. O princípio de funcionamento do LiDAR baseia-se na emissão de pulsos de luz e no cálculo do tempo de voo (time-of-flight) em uma varredura rotativa de 360°, mapeando o entorno e medindo distâncias com elevada precisão e exatidão (MCMANAMON, 2019). Por possuir fonte de radiação própria na faixa do infravermelho, o LiDAR apresenta a vantagem de operar de maneira confiável independentemente da iluminação ambiente — funcionando perfeitamente em total escuridão, sombras ou variações bruscas de luz —, superando limitações típicas de câmeras ópticas convencionais (CARVALHO; SOBIERANSKI; WANGENHEIM, 2015).

A literatura científica recente demonstra ampla aplicação do LiDAR 2D e 3D em tarefas de localização e mapeamento simultâneos (SLAM), fusão multimodal com sensores inerciais (IMU) e navegação em ambientes internos utilizando ferramentas acessíveis integradas ao Robot Operating System (ROS). Entretanto, a aplicação direta desses sensores junto a manipuladores robóticos para monitoramento do perímetro e orientação de ferramentas mecânicas impõe desafios práticos específicos, como a necessidade de

filtrar ruídos gerados pelas próprias vibrações da estrutura operacional e confirmar alterações no cenário sem disparar falsos alarmes.

Diante disso, este trabalho propõe a utilização do sensor LiDAR como elemento de percepção espacial para a identificação preventiva de situações de risco e obstáculos no perímetro operacional, associado a um manipulador robótico e a um sistema de visão por câmera no Laboratório de Manufatura (LABMAN/UFRN). O objetivo é desenvolver e validar um sistema computacional capaz de identificar objetos e obstáculos em ambientes fechados, tratar ruídos operacionais e fornecer coordenadas exatas de ângulo e distância para orientar o alinhamento da garra robótica. Dessa forma, busca-se contribuir para a consolidação de ambientes de trabalho mais seguros, promovendo o uso da tecnologia em prol da proteção humana e da confiabilidade em processos automatizados.

Metodologia

As atividades deste trabalho foram desenvolvidas no Laboratório de Manufatura (LABMAN) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), seguindo a estrutura do cronograma do projeto dividida em cinco etapas principais:

1. Fundamentação Teórica Foi conduzido um estudo aprofundado sobre os princípios físicos de funcionamento dos sensores LiDAR, englobando as tecnologias de tempo de voo (Time-of-Flight) e triangulação. A etapa incluiu a revisão da literatura referente ao uso de sensoriamento a laser em robótica, automação industrial e sistemas de monitoramento (CARVALHO; SOBIERANSKI; WANGENHEIM, 2015; MCMANAMON, 2019), fornecendo embasamento técnico para as definições de hardware e software.

2. Definição do Sensor Adequado à Demanda Realizou-se uma pesquisa e análise comparativa de mercado entre seis modelos de sensores LiDAR 2D e 3D (RPLiDAR A1M8, A2M8, C1, YDLIDAR X4 PRO, X2 e Hesai Pandar40P). Os parâmetros avaliados incluíram alcance, frequência de aquisição, resolução angular, campo de visão e custo. Por meio da aplicação da Matriz de Pugh, selecionou-se o modelo RPLiDAR C1 (Slamtec), dispositivo 2D que combina Direct Time-of-Flight (DTOF) e triangulação, apresentando alcance de 12 m, frequência de 10 Hz, resolução de 0,72° e campo de visão de 360°.

3. Caracterização do Ambiente e Integração ao Sistema

Nesta etapa, caracterizou-se o ambiente de operação no Laboratório de Manufatura (LABMAN), utilizando o sensor de forma independente na bancada para avaliar seu comportamento em campo. Identificou-se a necessidade de posicionar o RPLiDAR C1 na orientação invertida para que a representação angular e a varredura fossem fiéis às coordenadas do espaço físico real. Os testes nesta fase permitiram determinar o raio de detecção mais confiável, identificar pontos cegos, zonas com maior incidência de falhas e as limitações de alcance do sensor em relação à distância, tamanho e velocidade de

movimentação do objeto. Ao final desta caracterização, o sensor foi instalado no manipulador robótico para alinhar o plano de varredura com o sistema de visão por câmera e com a garra.

4. Desenvolvimento de Códigos Computacionais para a Aquisição e Processamento de Dados

Desenvolveu-se um software em Python executado em um microcomputador Raspberry Pi para a leitura e tratamento contínuo dos dados fornecidos pelo sensor. A arquitetura computacional foi dividida nas seguintes etapas sequenciais:

Configuração e Inicialização: Ativação dos parâmetros operacionais do motor e estabelecimento da comunicação com o sensor.

Escaneamento 360°: Aquisição em tempo real de varreduras completas medindo distância e ângulo dos pontos.

Tratamento Inicial das Amostras: Filtragem para remoção de leituras inválidas, de baixa qualidade ou fora do alcance útil.

Organização em Bins Angulares: Agrupamento das leituras em intervalos angulares padronizados para viabilizar comparações diretas entre varreduras sucessivas.

Filtragem de Ruído (Mediana Angular e Temporal): Aplicação de filtro de mediana angular para eliminar pontos isolados e ruídos ópticos, seguido por filtro de mediana temporal para mitigar oscilações rápidas causadas pela vibração mecânica do motor do sensor e do manipulador.

Construção do Mapa de Referência: Mapeamento do ambiente em estado estático para servir como padrão de comparação.

Lógica de Detecção e Confirmação: Comparação matricial entre as leituras atuais e o mapa de referência, aplicando critérios de persistência temporal (presença do objeto em varreduras consecutivas), agrupamento espacial mínimo de pontos e limiar adaptativo para evitar falsos positivos.

5. Realização de Testes Funcionais Foram executados testes funcionais no ambiente do LABMAN para avaliar o desempenho do sistema integrado. Durante os ensaios, introduziram-se obstáculos e objetos de teste com diferentes tamanhos e geometrias na zona de varredura. Os testes funcionais permitiram verificar a eficácia dos filtros na eliminação de ruídos por vibração, a rapidez no disparo dos alertas gráficos ("Activity Detected"), e a exatidão no fornecimento das coordenadas polares (ângulo e distância) destinadas ao correto alinhamento da câmera e do manipulador robótico.

Resultados e Discussões

Neste capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos ao longo das cinco etapas do trabalho desenvolvido no Laboratório de Manufatura (LABMAN/UFRN), confrontando as observações práticas com a literatura técnica da área.

Seleção do Sensor Adequado pela Matriz de Pugh

Tabela 1 – Comparativo técnico dos sensores LiDAR avaliados.

A análise comparativa entre os seis modelos de sensores LiDAR (RPLiDAR A1M8, A2M8, C1, YDLIDAR X4 PRO, X2 e Hesai Pandar40P) permitiu pontuar e estruturar as vantagens e limitações de cada dispositivo frente às necessidades da célula robótica do LABMAN. A aplicação da Matriz de Pugh confirmou a escolha do modelo RPLiDAR C1 (Slamtec). Os principais fatores que justificaram a sua seleção foram:

Tecnologia de medição: A combinação de Direct Time-of-Flight (DTOF) e triangulação proporcionou maior estabilidade de leitura em distâncias variadas quando comparada aos sensores exclusivamente baseados em triangulação (como os modelos A1M8, A2M8 e X4 PRO).

Resolução Angular e Alcance: O campo de visão de 360° com resolução de 0,72° a 10 Hz atendeu com folga aos requisitos de varredura detalhada no raio de operação de até 12 metros.

Viabilidade Financeira: O modelo 3D Hesai Pandar40P, apesar de apresentar alto alcance e resolução vertical, foi descartado devido ao custo incompatível com a aplicação 2D desejada, enquanto os modelos YDLIDAR apresentavam menor alcance útil e maior sensibilidade a ruídos.

Esses resultados corroboram os estudos de McManamon (2019) e Carvalho, Sobieranski e Wangenheim (2015), que ressaltam que sensores ToF (Time-of-Flight) mantêm uma menor degradação do sinal e melhor relação sinal-ruído sob iluminação fabril em relação aos métodos de triangulação convencionais.

Caracterização no LABMAN e Orientação do Sensor

Os testes iniciais em bancada permitiram caracterizar o comportamento do RPLiDAR C1 no ambiente real do LABMAN. Durante os ensaios, observou-se que a montagem padrão do sensor gerava uma leitura angular invertida em relação ao referencial cartesiano do espaço físico e do manipulador robótico.

Para corrigir essa divergência, adotou-se o posicionamento do sensor na orientação invertida ("de cabeça para baixo"). Essa adequação física, combinada ao ajuste no código de aquisição, garantiu que a varredura de 0° a 360° correspondesse exatamente à orientação espacial do laboratório.

Os testes de bancada também definiram o raio de detecção confiável do sensor no ambiente de trabalho (de 0,15 m até 3 m) e identificaram a presença de pequenos pontos cegos ocasionados por suportes de fixação da bancada, permitindo delimitar a zona útil de varredura para a integração posterior com o manipulador.

Avaliação do Processamento de Dados e Filtragem

A execução do código desenvolvido em Python no Raspberry Pi demonstrou eficiência na leitura e no tratamento contínuo dos dados. O fluxo de processamento respondeu adequadamente às etapas projetadas:

Organização em Bins Angulares: O agrupamento das leituras em intervalos padronizados permitiu comparar varreduras sucessivas de forma direta e sem alto custo de processamento.

Filtragem de Ruído: O filtro de mediana angular minimizou consideravelmente os pontos isolados e ruídos ópticos causados por reflexões superficiais. O filtro de mediana temporal atenuou as oscilações nas medições causadas pela vibração mecânica do motor do próprio LiDAR e da movimentação do manipulador robótico.

Detecção por Mapa de Referência: A comparação matricial entre a varredura atual e o mapa do ambiente estático permitiu identificar a presença de novos objetos mais precisamente, evitando falsos positivos devido à exigência de persistência temporal e agrupamento mínimo de pontos.

Testes Funcionais e Integração

Os testes funcionais executados com a introdução de obstáculos e objetos de teste no LABMAN validaram a integração do sistema.

Durante os ensaios, o software em Python respondeu rapidamente na identificação de alterações no ambiente, exibindo o alerta gráfico "Activity Detected" assim que um objeto mudava de posição dentro da zona de varredura útil.

O sistema forneceu as coordenadas polares (ângulo e distância) com exatidão, permitindo alinhar com precisão a visão por câmera e a garra do manipulador robótico em relação ao objeto detectado. Esses resultados confirmam que a filtragem e a arquitetura de software adotadas foram suficientes para garantir a confiabilidade e o tempo de resposta necessários para a aplicação robótica pretendida.

A Figura 1 ilustra o funcionamento da interface gráfica do sistema desenvolvido em Python durante os ensaios na célula de trabalho do LABMAN. Na tela da esquerda, observa-se o mapeamento de referência do ambiente estático, no qual a dupla filtragem reduziu os ruídos de fundo e definiu o contorno da bancada. Na tela da direita, é demonstrada a resposta do algoritmo à introdução de um objeto na zona de varredura: após atingir o critério de persistência temporal (5 confirmações consecutivas), o sistema disparou o alerta visual "Activity Detected" e extraiu as coordenadas polares do alvo. A imagem inferior confirma a relação direta entre o mapa computacional e a estrutura física do laboratório.

Figura 1 – Interface do sistema de monitoramento LiDAR operando no LABMAN: varredura estática de referência (esquerda); detecção de objeto com exibição de coordenadas polares e alerta visual (direita); vista frontal da bancada de testes e manipulador robótico no laboratório (abaixo).

Conclusão

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de sensoriamento a laser (LiDAR) integrado a um manipulador robótico e a um sistema de visão por câmera, com o objetivo de elevar a segurança operacional e automatizar o reconhecimento de obstáculos no Laboratório de Manufatura (LABMAN/UFRN).

Diante dos resultados obtidos nos ensaios práticos, conclui-se que:

Adequação do Sensor à Aplicação: O RPLiDAR C1 mostrou-se suficiente para testar a viabilidade da tecnologia na célula robótica. Trata-se de um sensor simples de baixo custo que cumpriu o seu papel na prova de conceito, embora cenários industriais mais complexos exijam dispositivos de maior robustez.

Algoritmos de Filtragem e Lógica de Detecção: O núcleo do trabalho residiu na eficiência da arquitetura de software desenvolvida no Raspberry Pi. Os filtros de mediana angular e temporal foram determinantes para eliminar ruídos de reflexão e mitigar a interferência causada pela vibração mecânica do manipulador. Além disso, a definição dos critérios de agrupamento espacial e persistência temporal garantiu que o algoritmo discriminasse apenas mudanças reais no ambiente estático, evitando o disparo de falsos alarmes.

Desempenho no Direcionamento Robótico: O fluxo de processamento apresentou resposta ágil na identificação de alterações no cenário operacional, emitindo alertas visuais e fornecendo as coordenadas de ângulo e distância necessárias para orientar o alinhamento correto da câmera e da garra robótica.

De modo geral, a solução desenvolvida cumpre a premissa de utilizar a tecnologia a favor da segurança do trabalho, poupando o operador humano da exposição direta a riscos no perímetro de atuação do robô.

Como propostas para trabalhos futuros, sugere-se:

A integração do código com a arquitetura ROS (Robot Operating System) para facilitar a comunicação modular entre múltiplos sistemas;

O teste com sensores de categoria industrial em cenários com maior dinâmica de movimento e presença de interferências físicas mais severas.

Referências

CARVALHO, A. C.; SOBIERANSKI, A. C.; WANGENHEIM, A. von. Processamento de nuvens de pontos e sensoriamento a laser aplicado à automação e robótica. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 20., 2015, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: SBA, 2015. p. 1-8.

MCMANAMON, Paul F. LiDAR Technologies and Systems. Bellingham: SPIE Press, 2019.

RASPBERRY PI FOUNDATION. Raspberry Pi Documentation: Hardware and OS specifications. Cambridge: Raspberry Pi Foundation, 2023. Disponível em:https://www.raspberrypi.org. Acesso em: 15 nov. 2025.

SHANGHAI SLAMTEC CO., LTD. RPLIDAR C1 360 Degree Laser Range Scanner Development Kit User Manual. Versão 1.0. Shanghai: Slamtec, 2023. Disponível em:https://www.slamtec.com. Acesso em: 10 out. 2025.

YDLIDAR. YDLIDAR X4 PRO Development Manual. Shenzhen: Shenzhen EAI Technology Co., Ltd., 2022. Disponível em:https://www.ydlidar.com. Acesso em: 12 out. 2025.

Anexos



Tabela 1 – Comparativo técnico dos sensores LiDAR avaliados.



Figura 1 – Interface do sistema de monitoramento LiDAR operando no LABMAN: varredura estática de referência (esquerda); detecção de objeto com exibição de coordenadas polares e alerta visual (direita); vista frontal da bancada de testes e manipulador robó



Figura 1 – Interface do sistema de monitoramento LiDAR operando no LABMAN: varredura estática de referência (esquerda); detecção de objeto com exibição de coordenadas polares e alerta visual (direita); vista frontal da bancada de testes e manipulador robó

CÓDIGO: ET1579

AUTOR: RHYRON GABRIEL AZEVEDO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: VICTOR ARAUJO FERRAZ

TÍTULO: Desenvolvimento do Subsistema de Comunicação do Satélite PotyraSat

Resumo

Este trabalho relata o desenvolvimento do subsistema de comunicação e telemetria do nanossatélite PotyraSat, um CubeSat 1U destinado ao sensoriamento remoto dos biomas do Nordeste brasileiro. A missão exige a transmissão confiável de dados em tempo real, demandando um hardware robusto para os segmentos espacial e terrestre. A metodologia baseou-se nas diretrizes de Engenharia de Sistemas da NASA aliadas ao PMBOK, abrangendo até a Fase C (Design Crítico). O projeto culminou no desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCI) projetada no software KiCad, integrando componentes comerciais de prateleira. Para a radiofrequência, selecionou-se o módulo transceptor RF4463F30 (chip Si4463), operando em 433 MHz. Os cálculos de orçamento de enlace validaram o sistema, demonstrando alcances teóricos de 92,58 km com modulação GFSK (500 kbps) e 32,85 km com 4GFSK (1000 kbps). Para o rastreamento, adotou-se o chip GPS u-blox NEO-M8N, capaz de operar em "Modo Aerotransportado" para contornar os Limites COCOM durante voos suborbitais e de balão de alta altitude. O leiaute da placa foi otimizado com preenchimento de planos de terra contínuos para mitigar interferências eletromagnéticas. Conclui-se que a arquitetura e o dimensionamento propostos atendem aos rigorosos requisitos da missão. As próximas etapas incluem a fabricação da placa, testes de bancada (Flat-Sat), campanhas de lançamento estratosférico e a estruturação da estação de solo.

Palavras-chave: Telemetria.CubeSat.Aeroespacial.Radiofrequência

TITLE: Development of the PotyraSat Nanosatellite Communication and Telemetry Subsystem

Abstract

This paper reports on the development of the communication and telemetry subsystem for the PotyraSat nanosatellite, a 1U CubeSat designed for remote sensing of the Brazilian Northeast biomes. The mission requires reliable real-time data transmission, demanding robust hardware for both space and ground segments. The methodology was based on NASA's Systems Engineering guidelines allied with PMBOK, covering up to Phase C (Critical Design). The project culminated in the development of a printed circuit board (PCB) designed in KiCad, integrating commercial off-the-shelf (COTS)

components. For radio frequency, the RF4463F30 transceiver module (Si4463 chip) operating at 433 MHz was selected. Link budget calculations validated the system, demonstrating theoretical ranges of 92.58 km with GFSK modulation (500 kbps) and 32.85 km with 4GFSK (1000 kbps). For tracking, the u-blox NEO-M8N GPS chip was adopted, capable of operating in "Airborne Mode" to bypass COCOM limits during suborbital and high-altitude balloon flights. The board layout was optimized with continuous ground planes to mitigate electromagnetic interference. It is concluded that the proposed architecture and sizing meet the strict mission requirements. The next steps include board manufacturing, Flat-Sat bench testing, stratospheric launch campaigns, and the structuring of the ground station.

Keywords: Telemetry.CubeSat.Aerospace.Radio Frequency

Introdução

O desenvolvimento de CubeSats tem se consolidado como uma alternativa de baixo custo para o acesso ao espaço, permitindo a execução de missões de pesquisa aplicada e capacitação técnica no âmbito universitário (3, 4). O projeto PotyraSat propõe um nanossatélite padrão CubeSat 1U voltado para o sensoriamento remoto dos biomas do Nordeste brasileiro. A validação desta plataforma ocorrerá por meio de campanhas de lançamentos utilizando balões de alta altitude e foguetes suborbitais. Para que a missão obtenha sucesso, o satélite depende estritamente do envio e recebimento de dados em tempo real. O presente plano de trabalho aborda especificamente o desenvolvimento do subsistema de comunicação e telemetria, que é vital para a operação e para o resgate seguro das informações geradas pela carga útil. Ademais, o objetivo central consistiu em projetar uma placa de comunicação robusta, realizar os estudos de viabilidade do enlace de rádio através de cálculos de orçamento de enlace e definir o hardware necessário tanto para o segmento espacial quanto para a futura estação de solo.

Metodologia

A metodologia adotada para o desenvolvimento do subsistema baseia-se nas diretrizes de Engenharia de Sistemas da NASA (1), aliadas a práticas de gerenciamento do PMBOK (2) e a elementos de metodologias ágeis. O fluxo de trabalho foi estruturado em 5 fases (A a E), com marcos de revisão, sendo assim, o trabalho aqui relatado corresponde até a Fase C (Design Crítico), cujo critério de saída é a Revisão Crítica de Design (CDR). Durante essas etapas, realizou-se o estudo de tecnologias disponíveis no mercado, a elaboração da arquitetura do sistema e a execução de cálculos matemáticos para atestar a viabilidade da comunicação. Para a validação teórica do enlace, aplicou-se a equação fundamental do orçamento de enlace (Figura 1) (9), onde a potência recebida P(RX) deve ser rigorosamente superior à sensibilidade do receptor S(RX) somada a uma margem de segurança contra o desvanecimento. A perda no espaço livre foi calculada em função da distância e da frequência em megahertz (MHz), garantindo que os componentes selecionados pudessem atender plenamente aos requisitos operacionais da missão suborbital.

Resultados e Discussões

A arquitetura da placa de telemetria foi definida a partir de uma análise comparativa rigorosa de diversos transceptores disponíveis. O componente selecionado foi o módulo RF4463F30, baseado no chip Si4463, escolhido por apresentar um enlace robusto com amplificador de potência capaz de entregar até +30 decibel-miliwatt (dBm) e amplificador de baixo ruído que proporciona sensibilidade de até -126 dBm (7). A decisão por operar na faixa de frequência de 433 MHz foi fundamentada na necessidade de ampliar o alcance do sinal e viabilizar a compatibilidade futura com a infraestrutura da Estação Multi Missão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Além disso, a família de componentes Si446 possui herança de voo comprovada em ambiente aeroespacial, tendo sido utilizada com sucesso em missões anteriores como a do FloripaSat (4, 5). O encapsulamento metálico do módulo também foi um fator determinante, pois atua como blindagem para reduzir interferências eletromagnéticas, o que facilita substancialmente o roteamento e a integração da placa principal através da interface Serial Peripheral Interface (SPI). Passando para a análise de desempenho do sistema, as simulações de orçamento de enlace atestaram a viabilidade da comunicação em diferentes cenários operacionais. Ao parametrizar o sistema operando com um pacote de 200 bytes na frequência de 433 MHz, os cálculos demonstraram que o uso da modulação Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK), com taxa de 500 kilobits por segundo (kbps) e sensibilidade de -97 dBm, permite um alcance teórico máximo de 92,58 quilômetros (Figura 2). Por outro lado, a utilização da modulação 4-Level Gaussian Frequency Shift Keying (4GFSK) a 1000 kbps melhora a taxa de transferência de dados, mas altera a sensibilidade para -88 dBm, o que reduz o alcance para 32,85 quilômetros (Figura 3). Esses resultados evidenciam o compromisso técnico clássico entre a velocidade de transmissão de dados e a distância máxima de recepção, permitindo que a equipe alterne as modulações via software conforme as necessidades específicas de cada fase do voo (6). No que diz respeito à geolocalização e ao rastreamento da plataforma, o principal desafio técnico foi contornar os Limites Comitê de Coordenação para Controles Multilaterais de Exportação (COCOM), que bloqueiam o funcionamento de receptores de Global Positioning System(GPS) civis em altitudes superiores a 18 quilômetros combinadas com velocidades acima de 500 metros por segundo. Para solucionar essa restrição inerente aos voos suborbitais, optou-se pela integração do módulo u-blox NEO-M8N (8). Este dispositivo destaca-se por permitir a configuração do "Modo Aerotransportado", garantindo a aquisição contínua de coordenadas durante toda a trajetória do foguete ou do balão estratosférico de forma confiável. Para garantir que o projeto se desenvolvesse de forma madura sob a ótica da engenharia de sistemas, seguiram-se orientações de agências espaciais, como a Agência Espacial Europeia (ESA), no mapeamento dos elementos de planejamento e produção do nanossatélite. Além de produtos gerenciais como a Estrutura Analítica do Projeto e os OKRs, o principal resultado prático desta etapa foi o projeto físico da Placa de Circuito Impresso (PCI) dedicada ao subsistema COMMS (Figura 4), desenvolvido no software KiCad. O esquemático foi estruturado para se integrar ao barramento geral do satélite, utilizando conectores padronizados (identificados como H1 e H2, com 20 pinos cada) por onde trafegam os sinais digitais (I2C, SPI, UART, GPIOs de propósito geral) e as tensões de alimentação, conectando-se diretamente a todas as demais placas. No circuito impresso, acomodou-se o módulo RF4463F30 interligado a um conector SMA Fêmea (Molex 73391-0083) para a antena SW433-WT36 de 5 cm. No tocante à geolocalização, tomou-se a decisão de engenharia de não utilizar um módulo GPS comercial fechado; em vez disso, o circuito foi desmembrado para embarcar diretamente o chip u-blox NEO-M8N utilizando componentes SMD, juntamente com

um conector U.FL(A)-LP(P)-088(02) e uma memória EEPROM MICROCHIP 24AA32A-I/SM. Essa abordagem otimizou a área da placa e restringiu o hardware apenas ao estritamente necessário para a missão. Por fim, devido à natureza mista do circuito, o leiaute foi desenhado com o preenchimento de planos de terra (GND) contínuos tanto na camada superior quanto na inferior da placa, uma técnica fundamental para garantir o isolamento adequado e impedir que as frequências eletromagnéticas das antenas e do RF causassem interferência nas vias de comunicação digital.

Conclusão

O presente trabalho atingiu seus objetivos ao estabelecer o dimensionamento e a arquitetura de hardware da placa de comunicação e telemetria do nanossatélite PotyraSat. A seleção técnica de componentes comerciais de prateleira, notadamente o módulo transceptor RF4463F30 e o receptor GPS u-blox NEO-M8N, demonstrou ser uma solução adequada e viável para suprir os rigorosos requisitos impostos por operações atmosféricas e de voos suborbitais. Os cálculos de enlace corroboraram a robustez do projeto, garantindo margens de segurança satisfatórias para a transmissão de dados. Como plano de ação para a continuidade da pesquisa, projeta-se a fabricação física da placa de circuito impresso, seguida da execução de testes de bancada do tipo Flat-Sat para a validação conjunta da eletrônica. Posteriormente, planeja-se a integração do subsistema em campanhas de lançamento com balões de alta altitude, o desenvolvimento estruturado de uma estação de solo dedicada ao rastreio e a condução de estudos paralelos para recepção direta e decodificação da telemetria do satélite.

Referências

1. NASA. (2016). NASA Systems Engineering Handbook (Rev. 2). [Washington, D.C.]: National Aeronautics and Space Administration 2. Project Management Institute (2021) A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 7th ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute. 3. Puig-suari, Prof & Turner, Clark & Ahlgren, William. (2001). Development of the standard CubeSat deployer and a CubeSat class PicoSatellite. 1. 1/347 - 1/353 vol.1. 10.1109/AERO.2001.931726. 4. Gabriel Mariano Marcelino, Edemar Morsch Filho, Sara Vega Martinez, Laio Oriel Seman, Eduardo Augusto Bezerra. In-orbit preliminary results from the open-source educational nanosatellite FloripaSat-I. Acta Astronautica. Volume 188. 2021. Pages 64-80,. ISSN 0094-5765. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.07.001. 5. M. G. Mariano et al., "Qualification and validation test methodology of the open-source CubeSat FloripaSat-I," in Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 31, no. 6, pp. 1230-1244, Dec. 2020, doi: 10.23919/JSEE.2020.000103. 6. K. V. C. K. de Souza, Y. Bouslimani and M. Ghribi, "Flight Software Development for a CubeSat Application," in IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems, vol. 3, no. 4, pp. 184-196, Dec. 2022, doi: 10.1109/JMASS.2022.3206713. 7. SILICON LABS. Si4464/63/61/60 High-Performance, Low-Current Transceiver. Datasheet. Austin, TX, [2026]. 8. U-BLOX. NEO-M8N GNSS module. Datasheet. Thalwil, Suíça, [2026]. 9. WIKIPEDIA. Link

budget. In: WIKIPEDIA, the free encyclopedia. Flórida: Wikimedia Foundation, 2026. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Link_budget.

Anexos



Figura 1 - Equação fundamental do orçamento de enlace



Figura 2 - Orçamento Enlace GFSK



Figura 3 - Orçamento Enlace 4GFSK



Figura 4 - PCI Subsistema COMM

CÓDIGO: ET1604

AUTOR: PAULO FELIPE CAMARA DE MACEDO

ORIENTADOR: MARCIA REGINA DA SILVA PEDRINI

TÍTULO: Desenvolvimento de Bebida Fermentada a partir de Resíduo de Jaboticaba Utilizando Leveduras Imobilizadas

Resumo

A valorização de subprodutos agroindustriais representa uma alternativa promissora para a economia circular e o desenvolvimento de novos alimentos funcionais. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar uma bebida fermentada produzida a partir do resíduo agroindustrial de jabuticaba (Plinia cauliflora), comparando o desempenho cinético de leveduras Saccharomyces cerevisiae na forma livre e imobilizada (encapsuladas em matriz de alginato de sódio a 2% m/v). O mosto de jabuticaba foi padronizado a 20 °Brix e a fermentação foi conduzida a 28 ± 2 °C ao longo de 8 dias, monitorando-se o consumo de açúcares (°Brix), a biomassa celular (g/L) e a produção de etanol (% v/v). O sistema imobilizado acelerou substancialmente a cinética fermentativa inicial e intermediária, atingindo 4,7% v/v de teor alcoólico no 4º dia (contra 2,9% v/v da forma livre) devido à elevada densidade celular e ao efeito protetor da matriz. Contudo, a levedura livre apresentou maior eficiência no consumo total de substrato e maior rendimento alcoólico final no 8º dia (6,9% v/v contra 6,1% v/v da encapsulada), resultado associado às limitações de transferência de massa no hidrogel ao final do processo. Conclui-se que a fermentação com resíduo de jabuticaba é tecnicamente viável, sendo o sistema encapsulado indicado para otimizar a produtividade volumétrica em processos mais curtos e o sistema livre recomendado para atingir a graduação alcoólica máxima.

Palavras-chave: Plinia cauliflora; Aproveitamento de resíduos; Fermentação alcoólica.

TITLE: Development of a fermented beverage from jabuticaba residue using immobilized yeast

Abstract

The valorization of agro-industrial by-products represents a promising alternative for the circular economy and the development of new functional foods. This study aimed to develop and evaluate a fermented beverage produced from jabuticaba (Plinia cauliflora) agro-industrial residue, comparing the kinetic performance of Saccharomyces cerevisiae

yeast in free and immobilized forms (encapsulated in a 2% w/v sodium alginate matrix). The jabuticaba wort was standardized to 20 °Brix, and the fermentation was conducted at 28 ± 2 °C over 8 days, monitoring sugar consumption (°Brix), cell biomass (g/L), and ethanol production (% v/v). The immobilized system substantially accelerated the initial and intermediate fermentation kinetics, reaching an alcohol content of 4.7% v/v on the 4th day (compared to 2.9% v/v for the free form) due to high cell density and the protective effect of the matrix. However, the free yeast demonstrated higher total substrate consumption efficiency and a higher final alcohol yield on the 8th day (6.9% v/v versus 6.1% v/v for the encapsulated form), a result associated with mass transfer limitations within the hydrogel toward the end of the process. It is concluded that fermentation using jabuticaba residue is technically feasible, with the encapsulated system being recommended to optimize volumetric productivity in shorter processes, while the free system is recommended to achieve maximum alcohol concentration.

Keywords: Plinia cauliflora; Residue valorization; Alcoholic fermentation.

Introdução

A valorização de resíduos agroindustriais representa uma estratégia essencial para a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento de novos produtos com valor agregado. A jabuticaba (Plinia cauliflora), fruta nativa do Brasil, possui elevada concentração de compostos bioativos, especialmente nas cascas e sementes, como antocianinas, flavonoides e ácidos fenólicos. No entanto, durante o processamento da fruta para a obtenção de polpas, geleias ou sucos, uma quantidade significativa de subprodutos é gerada, os quais ainda apresentam elevado potencial funcional e antioxidante (Fontes et al, 2019, Lima et al., 2023).

A fermentação alcoólica de frutas e subprodutos tem se mostrado uma alternativa promissora para o reaproveitamento de resíduos, contribuindo para o desenvolvimento de bebidas com propriedades sensoriais e funcionais diferenciadas. O uso de resíduos de jabuticaba para produção de fermentados pode representar uma inovação tecnológica, aliando o aproveitamento integral da fruta à obtenção de novos alimentos funcionais (Neves et al., 2021, Trajano, 2016)

O processo de fermentação pode ser ainda mais eficiente com a aplicação de leveduras imobilizadas. Essa tecnologia consiste na imobilização das células microbianas em matrizes poliméricas, como o alginato de sódio, promovendo maior estabilidade operacional, reutilização das células e controle mais preciso da fermentação. A imobilização celular tem sido amplamente explorada em fermentações alcoólicas e representa um avanço relevante para a produção de bebidas fermentadas a partir de matrizes não convencionais (Kourkoutas et al., 2004; De Souza et al, 2023).

Além disso, a utilização de leveduras imobilizadas pode contribuir para o aumento do rendimento fermentativo e da estabilidade microbiológica da bebida, fatores essenciais para a viabilidade tecnológica e econômica do processo. Estudos têm demonstrado que as células imobilizadas são mais resistentes a variações de pH, etanol e substrato, além de facilitarem a separação do produto final, reduzindo etapas de clarificação e filtração (Willaert & Nedović, 2006).

Assim, este projeto propõe o desenvolvimento de uma bebida fermentada inovadora a partir do resíduo agroindustrial de jabuticaba, utilizando a imobilização de leveduras como ferramenta tecnológica. Essa abordagem contribui com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 12 – Consumo e produção responsáveis, ao propor um modelo de economia circular com valorização de resíduos e inovação no setor de alimentos.

Metodologia

1. Obtenção do Resíduo e Polpa da Jabuticaba:

A jabuticaba será obtida no mercado local na cidade de Natal-RN. As frutas foram selecionadas de acordo com sua integridade e estágio de maturação adequado. Após a Lavagem com solução de hipoclorito de sódio 100 ppm por 10 minutos, o material foi enxaguado em água potável e drenado. A separação da polpa e resíduo foi realizada utilizando liquidificador industrial e filtração por peneiras. A amostras foram armazenadas à -18 ºC até sua utilização.

2. Preparo do Mosto Fermentável:

O preparo do mosto foi realizado seguindo a metodologia de Reis, et al. (2023), com adaptações. Inicialmente o resíduo e a polpa foram descongelados e porcionados em dois

recipientes diferentes com adição de água destilada (proporção 1:2) para facilitar a liberação de compostos solúveis. Os mostos foram pasteurizados a 65 °C por 30 minutos e resfriados à temperatura ambiente antes da inoculação. O teor de açúcares foi padronizado com solução de sacarose até a estabilização do mosto em 20°Brix. Foi adicionado 100mg/L de metabissulfito de potássio para inibir o crescimento bacteriano (Oliveira, et al. 2011).

3. Imobilização das Leveduras:

Foram utilizadas leveduras Saccharomyces cerevisiae (qual cepa?, marca?). As células serão ativadas em caldo YPD por 24h a 30 °C. Para imobilização, foi preparada segundo a metologia descrita em Pinto, et al. (2025), onde uma solução de alginato de sódio a 2% (m/v), misturada com a suspensão de leveduras foi gotejada utilizando seringa e bureta em solução de $CaCl_2$ 0,1 M, formando esferas por gelificação iônica. As cápsulas foram mantidas sob refrigeração (4 °C) até o uso

4. Fermentação:

O mosto fermentável foi inoculado com 10% (m/v) de cápsulas contendo leveduras livres (Sousa-Dias, et al. 2021). A fermentação foi conduzida a 28 ± 2 °C. O tempo de fermentação foi determinado com a estabilização do consumo de açúcares medido por °Brix (Oliveira, et al. 2011).

5. Análises diárias.

O teor alcoólico do fermentado foi determinado conforme a AOAC 920.56, utilizando destilação seguida de determinação da densidade por picnometria. Para isso, 25 mL da amostra foram transferidos para um balão de destilação, ao qual foram adicionados 5 mL de solução de óxido de cálcio (120 g/L). O destilado foi recolhido em balão volumétrico de 25 mL contendo 2 mL de água, mantido em banho de gelo, sendo posteriormente completado até o volume. A densidade foi determinada por picnometria e o teor alcoólico obtido por consulta à tabela correspondente. A biomassa foi determinada pelo método descrito por Lambrecht et al. (2026), mediante centrifugação de 5 mL do fermentado a 3248 g × por 1 min, seguida de lavagem do precipitado celular com água destilada e nova centrifugação. O material obtido foi seco em estufa a 90 °C por 15–24 h, resfriado em dessecador e pesado, sendo a massa da biomassa calculada pela diferença entre a massa do tubo contendo as células secas e a massa do tubo vazio. A concentração de açúcares no fermentado foi contabilizada utilizando o método de refratometria (refratômetro ATAGI, SMART-1).

Resultados e Discussões

O controle e o monitoramento do teor de sólidos solúveis (°Brix) são parâmetros críticos para garantir a eficiência, a padronização e a qualidade dos processos fermentativos. A determinação do °Brix inicial do mosto, comumente realizada por refratometria, é essencial para caracterizar o meio de cultivo antes de se iniciar a fermentação. Esse ajuste e padronização dos açúcares são fundamentais para que a levedura consiga atingir o teor alcoólico planejado para a bebida (Sousa-Dias, et al. 2021.).

A análise do consumo de açúcares (°Brix) ao longo dos 8 dias de fermentação demonstrou que as células livres de Saccharomyces cerevisiae apresentaram maior eficiência global na conversão do substrato em comparação às encapsuladas em alginato de sódio, com uma redução total de 4,42 °Brix (de 12,93 para 8,51 °Brix) contra 3,66 °Brix (de 12,77 para 9,11 °Brix), respectivamente. Embora o sistema imobilizado tenha iniciado a fermentação com um consumo ligeiramente superior nos dois primeiros dias, as células livres aceleram o processo a partir do terceiro dia devido ao contato direto e homogêneo com o mosto, enquanto a cinética de consumo das células encapsuladas permaneceu mais lenta e gradual devido à resistência difusional imposta pela matriz polimérica para a transferência de massa de açúcares e metabólitos. Contudo, apesar dessa taxa de consumo reduzida, o perfil constante demonstrado pelas esferas confirma a viabilidade do sistema imobilizado, sendo recomendados ajustes no tamanho das cápsulas ou no tempo de processo para otimizar o rendimento fermentativo nos ciclos subsequentes.

O controle e o monitoramento da biomassa e da concentração de células viáveis desempenham um papel crítico na eficiência e na estabilidade dos processos fermentativos. A manutenção de uma alta densidade de biomassa (ou alta concentração celular), obtida principalmente por meio de sistemas de imobilização celular, promove

um aumento significativo na produtividade das bebidas, na taxa de fermentação e na síntese de metabólitos.

A evolução da concentração de biomassa ao longo dos 8 dias de fermentação (Tabela 2) refletiu perfis cinéticos distintos entre os dois sistemas analisados. O tratamento utilizando leveduras livres apresentou uma fase lag inicial com posterior crescimento exponencial marcante a partir do 4º dia, atingindo a biomassa máxima no 7º dia de cultivo. Essa dinâmica é explicada pela ausência de restrições físicas na transferência de massa, o que permitiu o contato direto e homogêneo das células com os nutrientes e açúcares solúveis do mosto de jabuticaba, impulsionando a proliferação celular contínua em suspensão até a fase de escassez de substrato (Lambrecht et al., 2026).

Por outro lado, a condição com leveduras imobilizadas exibiu um pico precoce de biomassa no 3º dia de ensaio, seguido por um declínio gradual até o final do processo. Esse acúmulo inicial acelerado decorre da elevada densidade celular contida na matriz de alginato de sódio. Contudo, a redução progressiva da biomassa mensurável no meio a partir do 4º dia indica a limitação de nutrientes no interior das cápsulas provocada por barreiras difusionais, induzindo à desaceleração metabólica e à autólise celular no interior do hidrogel (Kourkoutas et al., 2004).

O monitoramento e o controle rigoroso da concentração de etanol ao longo do processo fermentativo são indispensáveis para assegurar a padronização, a estabilidade e a qualidade constante do produto final. Do ponto de vista sensorial, o teor alcoólico desempenha um papel chave na qualidade da bebida, sendo diretamente responsável por conferir atributos estruturais cruciais, como corpo e viscosidade.

A utilização de leveduras encapsuladas acelerou substancialmente a cinética fermentativa inicial e intermediária (Dias 2 a 6) em comparação às leveduras livres, atingindo 4,7% v/v de etanol no 4º dia contra apenas 2,9% v/v da forma livre. Esse comportamento é atribuído à elevada densidade celular no interior do biopolímero e ao microambiente protetor gerado pela matriz de imobilização, o qual reduz o impacto do estresse osmótico e favorece a taxa de conversão do substrato nos estágios iniciais do processo.

Entretanto, nos dias finais (Dias 7 e 8), observou-se uma inversão do rendimento alcoólico, com a levedura livre atingindo a maior concentração final (6,9% v/v contra 6,1% v/v da encapsulada). Essa desaceleração na fermentação encapsulada decorre principalmente das limitações de transferência de massa intrapartícula, em que a resistência à difusão do substrato e a retenção de etanol na matriz promovem inibição pelo produto no microambiente celular. Assim, a encapsulação se mostra vantajosa para maximizar a produtividade volumétrica em processos mais curtos, enquanto o sistema livre é preferível para atingir o teor alcoólico máximo ao final da batelada.

Conclusão

O presente trabalho demonstrou a viabilidade tecnológica do aproveitamento do resíduo de jabuticaba (Plinia cauliflora) para o desenvolvimento de uma bebida fermentada inovadora, promovendo a valorização agroindustrial e alinhando-se aos princípios da economia circular (ODS 12). A aplicação de leveduras imobilizadas em matriz de alginato de sódio mostrou-se altamente eficaz na aceleração da cinética fermentativa inicial e intermediária, atingindo 4,7 v/v de teor alcoólico já no 4º dia de processo, comparado a apenas 2,9 v/v do sistema com células livres. Esse resultado evidencia a eficiência da na encapsulação em proteger a biomassa e promover uma maior produtividade volumétrica em tempos reduzidos de batelada.

Por outro lado, o sistema com leveduras livres apresentou maior eficiência na conversão total de açúcares (4,42 °Brix consumidos) e maior rendimento alcoólico final (6,9 % v/v no 8º dia), em função da ausência de barreiras difusionais que, no sistema imobilizado, limitaram a transferência de massa e desaceleraram a atividade metabólica celular na etapa final. Em suma, a escolha entre os sistemas de fermentação dependerá dos objetivos industriais: a imobilização celular é ideal para processos contínuos ou de ciclo rápido visando ganho de produtividade, enquanto o uso de células livres é mais indicado para maximizar a extração e a graduação alcoólica ao final do processo. Para trabalhos futuros, recomenda-se a otimização do tamanho das cápsulas, a avaliação do reuso das esferas imobilizadas em ciclos consecutivos de fermentação e a realização de análise sensorial dos produtos obtidos, visando identificar possíveis diferenças nos atributos sensoriais entre as bebidas produzidas com células livres e imobilizadas.

Referências

De Sousa, L. F., Silva, E. R., Oliveira, M. G. et al. 2023. “Effective Application of Immobilized Yeast Cells in Consolidated Bioprocessing (CBP) for Bioethanol Production.” Journal of Biofuel Technology 15 (2): 123–134. https://doi.org/10.1016/j.biofuel.2023.06.045.

Fontes, Roberta Emilly Barbosa, Denise Santos Ruzene, e Daniel Pereira Silva. 2019. “Prospecção Tecnológica: Estudo da Multifuncionalidade da Fruta Jabuticaba e Seus Extratos em Diferentes Aplicações.” Anais do XI Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe, 178–186. https://www.simprod.ufs.br.

Kourkoutas, Y., Bekatorou, A., Banat, I. M., Marchant, R., & Koutinas, A. A. 2004. "Immobilization Technologies and Support Materials Suitable in Alcohol Beverages Production: A Review." Food Microbiology 21 (4): 377–397.

Lima, R., Silva, M. V. T., Gomes, B. A., Macedo, E. H. B. C., Santana, M. N., Amaral, A. C. F., Silva, J. R. A., Corrêa, P. G., Godoy, R. L. O., Santiago, M. C. P. A., et al. 2023. “Chemical Profile and Hematoprotective Activity of Artisanal Jabuticaba (Plinia jabuticaba) Wine and Derived Extracts.” Fermentation 9: 157. https://doi.org/10.3390/fermentation9020157.

Neves, Nathalia de Andrade, Paulo César Stringheta, Esteban García-Romero, e Sérgio Gómez-Alonso. 2021. “Elaboração e Caracterização de Fermentado Alcoólico de Jabuticaba (Plinia jaboticaba) Produzido Artesanalmente.” Research, Society and Development 10 (4): e3010413799. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.13799.

Trajano, Yvana Maria Gomes dos Santos. 2016. Desenvolvimento e Caracterização de Fermentado Alcoólico de Jabuticaba. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande. https://dspace.sti.ufcg.edu.br/jspui/handle/riufcg/2640.

Willaert, R. G., & Nedović, V. A. 2006. “Primary Beer Fermentation by Immobilised Yeast – A Review on Flavour Formation and Control Strategies.” Journal of Chemical Technology & Biotechnology 81 (8): 1353–1367. https://doi.org/10.1002/jctb.1582.

Sousa Dias, Miguel L., Vanessa B. Paula, Luís G. Dias, and Letícia M. Estevinho. 2021. “Mead Production Using Immobilized Cells of Saccharomyces cerevisiae: Reuse of Sodium Alginate Beads.” Processes 9 (4): 724. https://doi.org/10.3390/pr9040724.

Reis, Natália Caroline da Silva et al. Desenvolvimento de bebidas fermentadas alcoólicas produzidas de casca de abacaxi (Ananas comosus) com diferentes cepas de leveduras. In: Ciência e Tecnologia de Alimentos: o avanço da ciência no Brasil. Guarujá: Editora Científica Digital, 2023. v. 4, cap. 9, p. 109-121. DOI: https://doi.org/10.37885/230613289.

OLIVEIRA, M. E. S. et al. Fruit wine produced from cagaita (Eugenia dysenterica DC) by both free and immobilised yeast cell fermentation. Food Research International, v. 44, n. 7, p. 2391-2400, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.028.

Pinto, V. S., Rangel, C. P., Cordeiro, M. W. da S., de Deus, C., Zepka, L. Q., Lopes, E. J., da Silva, C. de B., Cichoski, A. J., Wagner, R., & de Menezes, C. R. (2025). Co-encapsulation of Lactobacillus acidophilus and different concentrations of chia oil (Salvia hispanica L.) by external ionic gelation. Food Hydrocolloids, 164, 111171. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111171

LAMBRECHT, Kiera; LOUW, Tobias; DU TOIT, Wessel; ALEIXANDRE-TUDO, Jose Luis. A multivariate statistical process control system for red wine fermentations based on mathematical modelling, infrared spectroscopy and process boundaries. Food Bioscience, v. 79, art. 108729, 2026. DOI:https://doi.org/10.1016/j.fbio.2026.108729.

AOAC INTERNATIONAL. Official Method 920.56: Specific gravity of wines (Pycnometer method). Rockville: AOAC International, 1920.

Anexos



Tabela 1 - Resultado da concentração de açúcares (°Brix) realizado pelo método de refratometria ao longo do tempo da bebida com células livres e encapsuladas.



Tabela 2 - Resultado de concentração de biomassa (g/L) realizado pelo método de Lambrecht et al. (2026) ao longo do tempo da bebida com células livres e encapsuladas.



Tabela 3 - Resultado de concentração de álcool (% v/v) realizado pelo método de AOAC 920.56 ao longo do tempo da bebida com células livres e encapsuladas.

CÓDIGO: ET1608

AUTOR: LETICIA MAIA MARQUES

ORIENTADOR: EDSON NORIYUKI ITO

TÍTULO: Produção de produtos por impressão 3D para uso específico de acessibilidade

Resumo

Com o advento de novas tecnologias na Indústria 4.0, a discussão acerca da inclusão tecnológica de pessoas com necessidades especiais tornou-se relevante na sociedade brasileira, especialmente no âmbito educacional e profissional. O surgimento de novas tecnologias assistivas tem se tornado cada vez mais necessário. Esse trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de medição de nível de substâncias adaptado ao uso em pipeta graduada de 10 ml, voltado para pessoas com deficiência visual. O protótipo é composto por um sistema eletrônico integrado baseado em Arduino, modelagem 3D adaptativa e manufatura aditiva para fabricação da peça.

Palavras-chave: Tecnologia assistiva; Impressão 3D; Deficiência visual.

TITLE: Production of 3D-printed products for accessibility purposes.

Abstract

With the advent of new technologies within Industry 4.0, the discussion regarding the technological inclusion of people with special needs has become increasingly relevant in Brazilian society, particularly in educational and professional contexts. The emergence of new assistive technologies has become increasingly necessary. This work aimed to develop a substance-level measurement system adapted for use with a 10 mL graduated pipette, intended for people with visual impairment. The prototype consists of an integrated electronic system based on Arduino, adaptive 3D modeling, and additive manufacturing for part fabrication. The circuit was validated both independently and when coupled to the printed adapter, correctly emitting an audible signal upon reaching the 10 mL measurement limit, resulting in a functional and low-cost assistive device.

Keywords: Assistive technology; 3D printing; Visual impairment.

Introdução

1. INTRODUÇÃO

Com o advento da Indústria 4.0, no novo milênio, criou-se uma demanda de reinvenção tecnológica marcada pela integração inteligente de sistemas, e pela automatização dos

processos de produção a partir de sensores, robôs e a utilização de impressoras 3D (PRADO; MATTOS; RODRIGUES, 2020). Nesse contexto de surgimento e aplicação dessas novas tecnologias advindas da era 4.0, a impressão 3D, empregada na construção deste projeto, destacou-se como uma ferramenta de aplicação interdisciplinar, contemplando as áreas biomédica, mecânica e mecatrônica.

A partir disso, surgiu a perspectiva acerca da aplicação dessa tecnologia no contexto da tecnologia assistiva, como um mecanismo de acessibilidade. Sob esta ótica, é pertinente evidenciar que, na modernidade, a acessibilidade não está cristalizada apenas no aspecto de mobilidade. Galvão (2008 apud LAPELUCCI; PINTO, 2020) afirma que a acessibilidade se amplia em seis vertentes fundamentais: Arquitetônica, Comunicacional, Metodológica, Instrumental, Programática e Atitudinal. Ainda assim, a produção de tecnologias assistivas em países em desenvolvimento enfrenta barreiras relacionadas a políticas limitadas de fornecimento e a financiamento insuficiente (TORO-HERNÁNDEZ et al., 2019 apud RIBEIRO et al., 2024), e é a partir desta lacuna que a impressão 3D se apresenta como uma forma de democratização do acesso a tecnologias assistivas.

É nesse contexto que esse projeto se insere. A partir de uma pesquisa em conjunto com a UFRN/FACISA, constatou-se que alunos com deficiência visual apresentavam uma lacuna educacional na aprendizagem prática no laboratório de química, decorrente da limitação do uso de vidrarias volumétricas, o que comprometia a inclusão plena no processo educacional. A partir disso, esse trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo de tecnologia assistiva de baixo custo voltado a promover a acessibilidade instrumental no que diz respeito aos equipamentos de medição volumétrica utilizados em experimentos químicos, por meio de um adaptador para pipetas integrado a um sensor de nível de líquido sem contato, que emite um sinal sonoro ao atingir o limite de medição da pipeta graduada de 10 mL.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manufatura aditiva e impressão 3D

A técnica de manufatura aditiva consiste na adição progressiva de camadas de material, diferenciando-se da manufatura tradicional, que consiste na fabricação por remoção de material. A impressão 3D, tecnologia empregada na construção deste projeto, consiste em um sistema baseado na técnica de manufatura aditiva para a construção de objetos tridimensionais, com altura, largura e comprimento, projetados a partir de softwares CAD (Computer-Aided Design), como o Autodesk AutoCAD, Creo Parametrics e o Autodesk Fusion, utilizado no desenvolvimento do presente projeto. Após a construção em software CAD do protótipo a ser impresso, usa-se um software de fatiamento, que divide o modelo para que o processo de fabricação seja realizado por partes, e a partir desses dados a impressora realiza a manufatura do objeto utilizando camadas de pequena escala (MORANDINI; DEL VECHIO, 2020).

Metodologia

2.2 Origem da Impressão 3D

O advento da técnica de impressão 3D, segundo Lonjon (2017), está associado ao japonês Hideo Kodama, do Instituto Municipal de Pesquisa Industrial de Nagoya, que registrou a construção de um sistema de prototipagem rápida no ano de 1980, integrado a uma cuba de material fotopolímero, capaz de produzir um modelo em camadas que posteriormente passava por um processo de endurecimento a partir da exposição a luz UV, tornando a peça rígida. No entanto, a atribuição da invenção da impressora 3D está associada ao engenheiro Charles Hull, que desenvolveu um sistema com funcionamento semelhante ao de Kodama, possuindo a patente da técnica de estereolitografia empregada pela sua impressora. A partir disso, Hull iniciou a produção e comercialização das primeiras impressoras 3D, que foram modernizadas até a diversidade de impressoras disponíveis no mercado atualmente (MORANDINI; DEL VECHIO, 2020).
A partir disso, surgiu um aspecto interdisciplinar a partir do advento da tecnologia de impressão 3D, integrando áreas como prototipagem e ciências dos materiais. Houve, também, uma ampliação dos escopos de aplicação dessa tecnologia, apresentando contribuições significativas nas áreas biomédica, mecânica e mecatrônica

2.3 Acessibilidade: definição e vertentes

A acessibilidade, na modernidade, não está associada apenas ao contexto da mobilidade. Galvão (2008 apud LAPELUCCI; PINTO, 2020) afirma que a acessibilidade se amplia em seis vertentes fundamentais: Arquitetônica, que visa mitigar a existência de barreiras físicas nos ambientes urbanos e espaços públicos; Comunicacional, que estabelece uma luta contra a limitação comunicacional, por meio de línguas de sinais, do braille e de outros mecanismos disponíveis; Metodológica, relacionada à facilitação do acesso a conteúdos pragmáticos, de caráter técnico e educacional; Instrumental, referente à adaptação de utensílios cotidianos, bem como de equipamentos empregados em contexto educacional e profissional; Programática, que garante o acesso a recursos sociais de forma igualitária; e Atitudinal, voltada ao combate ao preconceito e à disseminação de estigmas sociais.

2.4 Desafios da democratização do acesso a tecnologias assistivas

A discussão acerca da produção de tecnologias assistivas em países em desenvolvimento envolve aspectos socioeconômicos que dificultam o acesso desses mecanismos a pessoas em situação de vulnerabilidade. Em um recorte socioeconômico, a FEBRABAN (2006) aponta que 40,1% da população com deficiência possui renda equivalente a um salário mínimo ou menos, dos quais 10,6% não possuem rendimento algum, cenário associado, entre outros fatores, à baixa qualificação profissional desses grupos. Nesse sentido, Toro-Hernández et al. (2019 apud RIBEIRO et al., 2024) definem como principais barreiras as políticas limitadas quanto ao fornecimento, a insuficiência da força de trabalho e um cenário de custos elevados aliado à baixa disponibilidade. É a partir desta lacuna que a impressão 3D se apresenta como uma ferramenta de democratização do acesso às tecnologias assistivas, por se tratar de um processo de baixo custo e de pouca demanda de trabalho.

2.5 Barreiras das práticas de laboratório para pessoas com deficiência visual

O ensino de disciplinas com práticas laboratoriais, seja no ensino superior ou básico, enfrenta maiores desafios de inclusão de pessoas com deficiência visual quando comparado às disciplinas teóricas, que já contam com recursos auditivos e táteis, como é o caso do braille. Parte desses desafios está associada ao fato de que, para a realização dos experimentos, parte das medições é feita por instrumentos graduados, cujo volume é

constatado por leitura visual. A partir dessa constatação, o desenvolvimento de ferramentas adaptativas para pessoas com deficiência visual tem se tornado imprescindível. A exemplo disso, Santos et al. (2015) desenvolveram ferramentas com o propósito de facilitar o uso de equipamentos por pessoas com deficiência visual, entre elas: a) balança adaptada com sinalizador sonoro de fim de pesagem; b) indicador sonoro de cores de soluções do sistema RGB; c) sinalizador sonoro de ponto final de titulação; d) sistema pneumático de transferência de líquidos. Nessa perspectiva, o presente trabalho se propõe a contribuir para o acervo de tecnologias assistivas com caráter educativo voltadas às práticas laboratoriais.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu no desenvolvimento de algumas etapas fundamentais para a produção do protótipo, sendo estas: 1) identificação da resolução do problema; 2) seleção de materiais adequados; 3) construção do circuito eletrônico e testes; 4) modelagens 3D adaptadas ao circuito. 5) impressão 3D do protótipo. As cinco etapas serão descritas a seguir.

3.1 Identificação da resolução do problema

Inicialmente, o protótipo era constituído por um sensor de nível de líquido (Sensor de nível sem contato DJLK-A6), um resistor soldado na fonte e um suporte de pilha AA soldado a um motor de vibração, conforme Figura 1. Devido à simplicidade do protótipo, existiam muitos pontos problemáticos associados ao seu uso. O contato direto do circuito eletrônico com a pipeta, sem que houvesse alguma proteção do equipamento ou compartimento designado, deixava o sistema exposto a danos causados pelo contato com líquidos manipulados em práticas laboratoriais; além disso, o circuito não contava com nenhuma categoria de sistema embarcado, o que não garantia precisão na medição realizada pelo aparelho. O conjunto desses fatores gerou a necessidade de seu aprimoramento, tanto no circuito quanto no seu acoplamento.

Figura 1 - Protótipo inicial, contendo sensor DJLK-A6, motor de vibração e pilha. Fonte: Acervo da autora.

Resultados e Discussões

3.2 Prototipagem do circuito eletrônico

O circuito eletrônico deste projeto foi desenvolvido em conjunto com o Laboratório de Ensaios Mecânicos dos Materiais da UFRN. Inicialmente, o circuito foi modelado no software TinkerCad, para garantir o funcionamento correto do sistema, atendendo às necessidades requisitadas pelo projeto, bem como a construção do código em linguagem C, que seria processado na placa Arduino. A soldagem dos componentes eletrônicos, que serão abordados mais a frente, foi realizada em conjunto com o Laboratório de Prototipagem do Instituto Metrópole Digital - IMD/UFRN. Nesse processo foi utilizado fio de solda de estanho, pinça para realizar ajustes finos dos elementos, um sugador de solda para correção de erros e um multímetro para verificação da passagem de corrente.

Figura 2 – Simulação do circuito no software TinkerCad. Fonte: Acervo da autora.

3.3 Seleção de materiais para a fabricação do protótipo

A priori, a construção do circuito eletrônico baseado em sistemas embarcados de baixo custo foi o ponto de partida para o desenvolvimento do projeto, como discutido em 3.2. Inicialmente, o sistema foi projetado em um software de prototipagem, e, após sua finalização, iniciou-se a fase de construção física do circuito. Para tal, foi efetuada a compra dos componentes escolhidos, listados a seguir: sensor DJLK-A6, que foi posteriormente trocado pelo sensor XKC-Y26 NPN (Figura 2), um sensor capacitivo que que detecta a presença do líquido por meio da variação das constantes dielétricas do campo eletromagnético; microcontrolador Arduino Nano (Figura 3, item A), um pequeno computador de placa única que executa um programa definido pelo operador e envia sinais elétricos, controlando o funcionamento de motores, LEDs e sensores; Jumpers (Figura 3, item B) conectam os componentes eletrônicos a placa Arduino; Placa de Fenolite (Figura 3, item C), conecta componentes em placas de circuito impresso; Buzzer (Figura 3, item D), emite os sinais sonoros que indicam que o volume limite foi alcançado; Resistor de 1Kohm (Figura 3, item E), controla a corrente elétrica, gerando uma queda de tensão (diferença de potencial); Transistor npn 2222 (Figura 3, item F), permite o ligamento e desligamento do buzzer; Pilhas e Adaptador de pilhas (Figura 3, item G), fornecem energia para o funcionamento do circuito.

Figura 3 - Sensor XKC-Y26-NPN Fonte: Adaptado de Mercado Livre (2026).
Figura 4 - Componentes eletrônicos utilizados. Fonte: Acervo da autora.

Com a construção e definição dos componentes do circuito, a seleção de materiais voltou-se para a escolha do tipo de filamento que seria utilizado na impressão 3D. Como a impressão do material seria realizada no Laboratório de Reologia e Processamento de Polímeros (LABPOL) do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN, a consulta da disponibilidade dos materiais foi realizada, constatando-se que os mais adequados para aplicação no presente projeto seriam o PLA (Ácido Polilático) e o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno). Frente às características desejáveis, como a resistência mecânica, a flexibilidade, e o grau de dureza do material, constatou-se que o uso do ABS era mais adequado para a aplicação objetivada pelo projeto, dado que esse material possui uma melhor resistência a impactos e esforços mecânicos em conjunto a um grau de flexibilidade que permite a deformação do material sem que haja fratura, característica desejada para o funcionamento da braçadeira que conecta o sistema à pipeta, garantindo uma maior vida útil ao adaptador, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela das características dos materiais. Fonte: Adaptado de Sérgio Portela, 2018.

3.4 Modelagens 3D adaptadas ao circuito.

O processo de modelagem parte da construção do circuito eletrônico, adaptando-se a sua arquitetura. Partindo disso, é fundamental evidenciar que durante a construção do protótipo, houve adaptações realizadas para acompanhar modificações e melhorias feitas ao sistema eletrônico. Inicialmente, idealizou-se o design externo do adaptador através de um desenho a mão livre, conforme Figura 5, nesse design inicial pensou-se em um compartimento retangular de bordas arredondadas, fixo à pipeta através de uma braçadeira. É importante ressaltar que por se tratar de uma ideia inicial, as dimensões ainda não haviam sido definidas.

Figura 5 - Desenho a mão livre do primeiro modelo do adaptador. Fonte: Acervo do autor.

A fim de facilitar a visualização do protótipo idealizado, foi desenvolvido no software CAD Fusion Autodesk o primeiro modelo tridimensional (Figura 6) deste projeto cujas medidas estão explicitadas na Tabela 2, dado que este primeiro modelo possuía caráter instrutivo, suas dimensões internas e externas não refletiam o tamanho real necessário para acoplar o circuito.

Figura 6 – Primeiro modelo tridimensional do adaptador (caráter instrutivo) Fonte: Acervo da autora.
Tabela 2 – Dimensões do primeiro modelo tridimensional.

Apesar disso, como o sensor já havia sido definido e seu funcionamento obrigava que houvesse contato direto com a pipeta, isso exigia que houvesse um furo no modelo para que esse contato acontecesse, portanto foi feita a medição do diâmetro desse componente e a medida do diâmetro externo da pipeta.
Como essas peças tratavam-se de encaixes, buscou-se na literatura os valores de tolerância adequados para a impressão em ABS, dado que cada material possui um fator de encolhimento próprio, isto é, como o processo de impressão ocorre em altas temperaturas, os materiais sofrem compressão quando sua temperatura se equilibra à temperatura ambiente.
Inicialmente foi necessário definir que tipo de encaixe era adequado de acordo com a função desempenhada, que no caso do encaixe para o sensor e para a pipeta, são classificados com funcional justo, permitindo o encaixe firme, no entanto móvel, desses componentes. A partir dessa definição as tolerâncias foram definidas dentro do intervalo definido na Tabela 3 para a combinação de material: ABS; e Encaixe: Funcional Justo.

Tabela 3 – Tolerância de encaixe recomendadas por material de impressão.

Após a definição das tolerâncias adequadas, conforme Tabela 4, foi impresso um modelo teste de encaixe registrado na Figura 7.

Tabela 4 – Medidas finais do encaixe do adaptador.

Figura 7 – Teste de encaixe impresso (ABS branco). Fonte: Acervo da autora.

Dessa forma, com a verificação de que o encaixe estava adequado ao seu objeto, foi realizada a impressão do primeiro modelo 3D em ABS (Figura 8), dando uma noção inicial de como o sensor seria estruturado.

Figura 8 – Primeiro modelo impresso em ABS, acoplado a pipeta. Fonte: Acervo da autora.

A projeção do primeiro circuito eletrônico usava como fonte de alimentação uma bateria de 9V e o sensor de nível modelo DJLK-A6, logo, o primeiro passo foi definir a distribuição do circuito dentro de modelo idealizado a partir da medição dos seus componentes, de forma que o adaptador pudesse comportar o equipamento aproveitando da melhor forma possível o espaço. Após isso, foi projetado um novo modelo (Figura 9) com as dimensões listadas na Tabela 5.

Figura 9 – Novo modelo do adaptador. Fonte: Acervo da autora.

No entanto esse modelo não chegou a ser impresso devido uma falha no circuito eletrônico, como estava sendo investigado o motivo do erro, o circuito estava suscetível a mudanças no número ou modelo dos componentes. Diante disso, houve adaptações na parte eletrônica, onde a bateria foi substituída por 4 pilhas AA, e o sensor de nível foi substituído pelo modelo XKC-Y26 NPN, e consequentemente na modelagem do adaptador, a fim de evitar o desperdício de material, o encaixe do novo sensor também foi testado através de testes, dado que havia uma arredondamento das bordas, após medição com o paquímetro, foi constatado que o raio estava entre 2,0 mm e 3,0 mm, logo foram impressos testes com arredondamentos de raios 2,0 mm, 2,5 mm e 3,0 mm e tolerâncias de 0,20 mm e 0,30 mm, conforme Figura 10. Os testes mostraram que a opção com arredondamento de raio 2,0 mm tolerância de 0,20 mm apresentou o encaixe significativamente melhor.

Figura 10 – Peças de teste: encaixes para o adaptador de pilhas e testes de arredondamento. Fonte: Acervo da autora.

Dado que as dimensões do adaptador para pilhas aumentaram significativamente o espaço ocupado pelo circuito, a solução encontrada para aproveitar o espaço de maneira mais efetiva foi criar um andar dentro do adaptador, através de uma gaveta removível (Figura 11) que seria acoplada acima do compartimento do Arduino Uno, onde seriam colocados encaixes para o adaptador de pilhas.

Figura 11 – Vista interna do compartimento com gaveta removível para pilhas. Fonte: Acervo da autora.
Figura 12 – Detalhe da peça da gaveta removível. Fonte: Acervo da autora.

Um ponto de atenção também, foi o abaulamento de raio 1,0 mm dos cantos vivos que constituam base de partes que iriam sofrer algum tipo de deformação durante o uso, como o suporte para adaptador de pilhas na gaveta e o suporte para o Arduino.

Figura 13 – Abaulamento de raio 1,0 mm aplicado aos cantos vivos do apoio. Fonte: Acervo da autora.

O modelo final é formato pela gaveta, o corpo (Figura 14) e a tampa (Figura 15). A tampa inicialmente não tinha outros objetivos no projeto, no entanto, surgiu a demanda de que ela tivesse um formato ergonômico que facilitasse o manuseio do sensor. Nesse sentido, foi modelada uma tampa de formato elipsoide, e com um encaixe de dedos, a fim de melhorar o conforto do usuário durante o uso. As medidas e tolerâncias de todos os componentes estão explicitadas no desenho técnico no Anexo A, Anexo B e Anexo C, que posteriormente foram impressos e testado, como será discutido adiante.

Figura 14 – Modelo final do adaptador. Fonte: Acervo da autora.
Figura 15 – Tampa de formato elipsoide com encaixe de dedos. Fonte: Acervo da autora.

3.5 Impressão 3D do protótipo

A etapa final da realização do protótipo tridimensional foi a impressão da peça, que foi manufatura em uma impressora Creality K2 Plus Combo utilizando o bico de extrusão de diâmetro 0,6 mm, para esse processo foram necessárias 166g de filamento, neste projeto foi utilizado o ABS Premium High Speed Natural, da marca 3DPrime, com temperatura de impressão de 230° C no bico, 110° C na mesa e 50° C na câmara. Todo o processo de

impressão da peça durou 11 horas, com a impressora trabalhando a uma velocidade de 150 mm/s. É relevante apontar que o alto tempo de produção se deve ao fato da peça ter sido impressa com um preenchimento de 100%, com camadas de altura de 0,20mm em formato grade, a fim de garantir uma maior resistência mecânica, e uma maior exatidão no resultado (Figura 16).

Figura 16 – Peças finais impressas do protótipo. Fonte: Acervo da autora.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a finalização da montagem do circuito eletrônico e da impressão da peça em ABS, conforme descrito na seção 3.5, foram realizados testes funcionais do sistema, a fim de validar tanto o funcionamento do circuito isolado, como também do seu funcionamento após acoplamento a parte impressa.

Inicialmente o circuito foi testado fora do adaptador, permitindo que fosse verificado o funcionamento do sensor de nível, do microcontrolador Arduino e do buzzer. Nessa etapa, foi constatado que o sistema respondia corretamente quando o líquido atingia o volume desejado, emitindo corretamente o sinal sonoro, e validando o código responsável por seu funcionamento, além da eficácia de detecção do sensor capacitivo.

Em seguida, o circuito eletrônico foi acoplado dentro dos seus compartimentos e encaixes adequados dentro do adaptador (Figura 17), reproduzindo as condições reais de uso do dispositivo. Esses testes retornaram uma resposta positiva, de que o funcionamento permanecia eficiente, continuando a emitir o sinal sonoro corretamente, apesar do acoplamento dos componentes do circuito.

Figura 17 – Circuito eletrônico acoplado ao adaptador. Fonte: Acervo da autora.

A partir desses testes em ambas as condições discutidas, o sistema foi definitivamente integrado ao adaptador, tornando todo o protótipo compacto se seguro. O encaixe entre as peças, projetados a partir das tolerâncias analisadas na seção 3.4 garantiram uma fixação firme dos componentes, fixando adequadamente o sensor à pipeta, sem que houvesse interferência na leitura. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que o trabalho desenvolvido atende ao objetivo visado, oferecendo uma alternativa de baixo custo e de fácil reprodução para garantir acessibilidade de pessoas com deficiência visual em práticas laboratoriais.

Conclusão

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de tecnologia assistiva de baixo custo, voltado à promoção da acessibilidade instrumental de pessoas com deficiência visual em práticas laboratoriais que fazem uso de vidrarias volumétricas como a pipeta graduada. A partir da implementação de um circuito eletrônico baseado em Arduino e um sensor capacitivo integrado a um adaptador fabricado por meio da manufatura aditiva por impressão 3D, possibilitando a construção de um dispositivo funcional que emite um sinal sonoro ao atingir o limite de medição da pipeta graduada.

Os testes realizados, tanto com o circuito isolado, quanto acoplado ao adaptador confirmaram a funcionabilidade do sistema, demonstrando que o trabalho desenvolvido satisfaz o seu objetivo inicial. A escolha dos materiais adequados, como o ABS utilizado na impressão, garantiu a peça a resistência mecânica e a flexibilidade necessária para o uso cotidiano da braçadeira sem que haja fratura. Além disso, os testes realizados para encontrar a melhor tolerância, garantiu o refinamento do design até o resultado final com encaixes firmes.

Conclui-se, portanto, que a impressão 3D se consolida como uma ferramenta eficaz para a democratização do acesso a tecnologias assistivas, principalmente em contextos em que os recursos disponíveis são limitados, pois facilita a produção de soluções reproduzíveis e de baixo custo. Como perspectivas futuras, sugere-se a validação do protótipo com participação do público-alvo, pessoas com deficiência visual, dentro de um ambiente real de laboratório, e a adaptação do sistema para outras vidrarias.

Referências

REFERÊNCIAS

PCORADO, Adolpho Nilson; MATTOS, Érica Cristina do Amaral; RODRIGUES, Fábio da Silva. Manufatura aditiva: conceitos, aplicações e impactos na gestão. 2020.

MORANDINI, Moisés Miranda; DEL VECHIO, Gustavo Henrique. Impressão 3D, tipos e possibilidades: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências. 2020.

LAPELUCCI, Jean Ricardo; PINTO, Giuliano Scombatti. Tecnologia assistiva e seus conceitos e fundamentos. 2020.

RIBEIRO, Bárbara Bernadelli; FRANCO, Taynara Araújo; MATOS, Karyne Gonçalves; GONÇALVES, Pedro H. Impressão 3D e tecnologia assistiva: adaptadores para pessoas com dificuldade motora nas mãos. HFD, v. 13, n. 26, p. 114-132, dez. 2024.

FEBRABAN – FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE BANCOS. População com deficiência no Brasil: fatos e percepções. 2006. SANTOS, Sérgio R. B. et al. Química experimental para deficientes visuais. Latin American Journal of Science Education, 2015.

MERCADO LIVRE. Sensor de nível XKC-Y26 NPN. Disponível em: mercadolivre.com.br. Acesso em: 2026.

PORTELA, Sérgio. Comparativo de propriedades de filamentos para impressão 3D. 2018. ZOOM DIGITAL. Tolerâncias na impressão 3D: folgas em encaixes e

mecanismos. Disponível em: https://zoomdigital.com.br/tolerancias-na-impressao-3d-folgas-encaixes-mecanismos/.

Anexos



Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4



Figura 5



Figura 6



Figura 7



Figura 8



Figura 9



Figura 10



Figura 11



Figura 12



Figura 13



Figura 14



Figura 15



Figura 16



Figura 17



Tabela 1



Tabela 2



Tabela 3



Tabela 4



Anexo A



Anexo B



Anexo C

CÓDIGO: ET1640

AUTOR: VITORIA DA SILVA SANTOS

ORIENTADOR: ANTONIO EDUARDO MARTINELLI

TÍTULO: Síntese de nanopartículas funcionais para o setor da energia

Resumo

O presente trabalho foi desenvolvido durante as atividades de iniciação científica, tendo como foco o acompanhamento da síntese e caracterização de nanoestruturas de óxidos, além da organização e controle dos reagentes químicos utilizados no laboratório.

Na parte experimental, foram acompanhadas sínteses hidrotérmicas de óxido de ferro (Fe_3O_4) e trióxido de molibdênio (MoO_3), observando etapas como o preparo dos precursores, realização das sínteses e tratamento das amostras. Também foram acompanhadas técnicas de caracterização como difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS), utilizadas para avaliar características estruturais, morfológicas e composicionais dos materiais.

Paralelamente, foi realizado um levantamento dos reagentes presentes no laboratório, com organização de informações como quantidade, responsável pela utilização, projeto relacionado, propriedades químicas e compatibilidade entre os produtos. Também foi pesquisada a legislação referente ao controle de produtos químicos, considerando as normas da Polícia Federal e os Produtos Controlados pelo Exército.

As atividades permitiram um contato mais amplo com a rotina de pesquisa, mostrando a importância tanto dos procedimentos experimentais quanto da organização e do controle dos reagentes para o desenvolvimento das atividades laboratoriais de forma adequada e segura.

Palavras-chave: Síntese hidrotérmica; Nanoestruturas; Óxidos metálicos; Reagentes

TITLE: Synthesis of functional nanoparticles for the energy sector

Abstract

This work was carried out as part of undergraduate research activities, focusing on monitoring the synthesis and characterization of oxide nanostructures, as well as organizing and managing the chemical reagents used in the laboratory.

The experimental phase involved monitoring the hydrothermal synthesis of iron oxide (Fe_3O_4) and molybdenum trioxide (MoO_3), covering stages such as precursor preparation, the synthesis process itself, and sample treatment. Characterization techniques—including X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)—were also employed to assess the structural, morphological, and compositional characteristics of the materials.

Concurrently, an inventory of laboratory reagents was conducted, organizing data such as quantities, responsible users, associated projects, chemical properties, and product compatibility. Regulations regarding chemical control were also reviewed, specifically those established by the Federal Police and the Army's controlled products guidelines.

These activities provided broad exposure to research routines, highlighting the importance of both experimental procedures and reagent management—including organization and control—for the proper and safe conduct of laboratory work.

Keywords: Hydrothermal synthesis; Nanostructures; Metal oxides; Reagents

Introdução

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais tem um papel importante no avanço das tecnologias voltadas para a área de energia. Com o aumento da demanda por energia e a necessidade de reduzir os impactos ambientais ligados ao uso de combustíveis fósseis, cresce a busca por soluções mais eficientes e sustentáveis. Nesse cenário, a transição energética depende não só do uso de diferentes fontes de energia, mas também do desenvolvimento de materiais com bom desempenho em aplicações como armazenamento de energia, conversão eletroquímica, catálise e sensores (DARR et al., 2017).

Entre os materiais estudados, os nanomateriais ganham destaque pelas propriedades que podem apresentar em comparação com os materiais convencionais. De modo geral, são

chamados de nanomateriais aqueles que possuem pelo menos uma dimensão na escala nanométrica, normalmente menor que 100 nanômetros. Nessa escala, a maior relação entre área superficial e volume, junto com os efeitos ligados ao tamanho das partículas, pode modificar propriedades estruturais, químicas, ópticas, elétricas e magnéticas. Por isso, esses materiais apresentam potencial para diversas aplicações tecnológicas (TAZIM et al., 2025).

Dentro desse grupo, as nanoestruturas de óxidos metálicos se destacam pela variedade de propriedades, estabilidade química e possibilidade de serem produzidas por diferentes métodos de síntese. Esses materiais podem ser utilizados em processos catalíticos, dispositivos eletrônicos, sensores, sistemas fotocatalíticos e tecnologias relacionadas à conversão e ao armazenamento de energia. Óxidos contendo elementos como ferro, molibdênio, titânio, nióbio e estanho também apresentam potencial para aplicações na área de energia, aumentando o interesse pelo desenvolvimento e estudo desses materiais (DARR et al., 2017; TAZIM et al., 2025).

As características dos materiais obtidos estão diretamente relacionadas à rota de síntese utilizada. Fatores como tamanho e forma das partículas, cristalinidade e composição química podem influenciar suas propriedades e, consequentemente, seu desempenho. Entre os diferentes métodos existentes, a síntese hidrotérmica é utilizada para a produção de óxidos metálicos nanoestruturados. O método envolve reações em meio aquoso, normalmente sob temperaturas elevadas e pressão gerada dentro de recipientes fechados. Parâmetros como temperatura, tempo de reação, pH, concentração dos precursores e composição do meio reacional podem influenciar as características finais dos materiais produzidos (XU; XUE, 2017; DARR et al., 2017).

Durante as atividades de iniciação científica, foram acompanhadas sínteses de nanoestruturas de óxidos realizadas por alunos de mestrado do laboratório, utilizando a rota hidrotérmica. Foram acompanhados sistemas com ferro e molibdênio, permitindo observar etapas como o preparo das soluções precursoras, a realização das sínteses e os primeiros procedimentos de caracterização dos materiais obtidos. Essa experiência permitiu observar, na prática, como as condições experimentais podem influenciar as características dos materiais e a importância do controle das diferentes etapas da síntese.

Além das atividades ligadas à síntese e caracterização, o trabalho também envolveu a organização e o gerenciamento dos reagentes utilizados no laboratório. Foram consideradas informações relacionadas à identificação, quantidade, armazenamento, utilização e controle dos produtos. Alguns reagentes utilizados em laboratórios estão sujeitos ao controle de órgãos reguladores, dependendo de fatores como composição, concentração e quantidade. Dessa maneira, a atividade de pesquisa envolve tanto o desenvolvimento experimental quanto a organização e o controle dos insumos necessários para a realização das atividades de forma adequada e segura.

Metodologia

1. Acompanhamento das sínteses

Durante as atividades de iniciação científica, foram acompanhados procedimentos

relacionados à síntese de dois materiais óxidos, o óxido de ferro (Fe_3O_4) e o trióxido de molibdênio (MoO_3). Foi possível observar diferentes etapas, desde a preparação dos reagentes e das soluções precursoras até a realização das sínteses e os tratamentos posteriores das amostras destinadas à caracterização.

1.1. Sistema 1 — Óxido de ferro (Fe_3O_4)

A síntese do óxido de ferro foi realizada utilizando sulfato de ferro(II) heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) e cloreto de ferro(III) hexahidratado ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) como precursores. O procedimento foi realizado em meio alcalino, utilizando hidróxido de amônio (NH_4OH) como agente alcalinizante.

Para o preparo da síntese, a água utilizada foi previamente desgaseificada por aplicação de vácuo, buscando diminuir a quantidade de oxigênio dissolvido. Durante a dissolução dos sais de ferro, foi realizado o borbulhamento de argônio na solução, mantendo uma atmosfera inerte e reduzindo a possibilidade de oxidação das espécies de ferro presentes.

Após o preparo da mistura reacional, o material foi colocado em um reator hidrotermal e submetido a 134 °C durante 3 horas. Depois desse período, o material obtido passou por cinco etapas de lavagem com água destilada previamente desgaseificada, até que o sobrenadante apresentasse aproximadamente pH 5. Em seguida, a amostra foi levada para uma estufa a vácuo para remoção da umidade.

As quantidades dos precursores, da água e do hidróxido de amônio ainda precisam ser confirmadas com o responsável pela síntese e serão acrescentadas posteriormente à metodologia.

1.2. Sistema 2 — Óxido de molibdênio (MoO_3)

Para a obtenção do trióxido de molibdênio, foi utilizado o heptamolibdato de amônio tetrahidratado ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$) como precursor. Inicialmente, o material passou por uma etapa de calcinação a 500 °C durante 4 horas. Após essa etapa, o produto obtido foi utilizado na preparação da solução para a síntese.

Em seguida, o material foi dissolvido em uma solução contendo peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 30% e água destilada, mantendo a mistura sob agitação. A solução foi então transferida para um reator de aço inoxidável revestido internamente com Teflon e submetida ao tratamento hidrotérmico a 160 °C.

Após o tratamento, o material obtido passou pelas etapas posteriores de processamento, incluindo lavagem, secagem e tratamento térmico, de acordo com o procedimento utilizado na síntese.

As quantidades dos reagentes, o tempo do tratamento hidrotérmico e as condições das etapas posteriores ainda precisam ser confirmados com o responsável pela síntese e serão acrescentados após a confirmação dos dados experimentais.

2. Caracterização das amostras

Após as etapas de síntese e tratamento, as amostras de Fe_3O_4 e MoO_3 foram submetidas a técnicas de caracterização para avaliar diferentes características dos materiais obtidos. Foram utilizadas a difração de raios X (DRX), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS).

A DRX foi utilizada para verificar as fases cristalinas presentes nas amostras e obter informações sobre sua estrutura. No caso do MoO_3, os resultados apresentaram reflexões compatíveis com a estrutura ortorrômbica do α-MoO_3.

A MEV foi utilizada para observar a morfologia e as características superficiais das amostras. Para o α-MoO_3, as imagens mostraram partículas predominantemente alongadas e anisotrópicas, com características semelhantes a placas ou bastonetes, além da presença de regiões com aglomeração.

Já a EDS foi utilizada em conjunto com a MEV para identificar qualitativamente os elementos químicos presentes nas amostras e observar sua distribuição nas regiões analisadas.

A utilização conjunta dessas técnicas permitiu obter informações complementares sobre os materiais, relacionando sua estrutura cristalina, morfologia e composição elementar.

3. Organização e controle dos reagentes

Durante as atividades realizadas no laboratório, também foi feito um levantamento dos reagentes químicos presentes na rotina experimental, com atenção à identificação, organização e controle dos produtos. Essa etapa facilitou a localização dos reagentes e a consulta de informações relacionadas ao seu uso e armazenamento. Também foram observados produtos que podem estar sujeitos ao controle de órgãos reguladores, considerando sua composição, concentração e quantidade.

A partir desse levantamento, foi elaborada uma tabela para organizar informações como nome do produto, fórmula química, quantidade disponível, tipo de reagente, responsável pela utilização e projeto ao qual está relacionado. Esse registro permitiu ter uma visão mais clara dos produtos presentes e de sua relação com as diferentes atividades de pesquisa.

Também foi realizado o acompanhamento das massas dos reagentes, permitindo registrar as quantidades disponíveis e observar alterações no estoque após sua utilização. Esse controle facilita a identificação da necessidade de reposição e mantém um registro mais organizado dos materiais.

Outro ponto considerado foi a compatibilidade entre os reagentes e as condições adequadas de armazenamento. Foram levantadas informações sobre propriedades químicas, reatividade, riscos e possíveis incompatibilidades entre substâncias. Esses dados são importantes para evitar o armazenamento inadequado de produtos e reduzir possíveis riscos na rotina do laboratório.

Os reagentes também foram organizados de acordo com seus tipos e características, facilitando sua localização e a consulta das informações antes da utilização. A relação entre os produtos, seus responsáveis e os projetos em que são empregados também

contribui para um acompanhamento mais específico do uso dos materiais.

Dessa forma, o levantamento realizado não se limitou à identificação dos reagentes, mas envolveu também a criação de uma estrutura para sua organização e acompanhamento. O controle

Resultados e Discussões

MoO_3

A formação e a estrutura cristalina do material foram avaliadas por difração de raios X (DRX). O difratograma obtido apresentou reflexões bem definidas e de elevada intensidade, indicando a formação de um material cristalino. Observam-se reflexões características em aproximadamente 12,8°, 23,3°, 25,7°, 27,4°, 33,7°, 39,0°, 46,3°, 49,3° e 58,8° (2θ), entre outras reflexões de menor intensidade. O conjunto de picos é compatível com a estrutura ortorrômbica do α-MoO_3, indicando a obtenção da fase cristalina desejada. A elevada intensidade de determinadas reflexões também sugere a ocorrência de crescimento cristalino preferencial, característica que pode estar relacionada à natureza anisotrópica da estrutura lamelar do α-MoO_3.

A morfologia do material foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As micrografias revelam a formação predominante de partículas alongadas e anisotrópicas, com morfologia do tipo placas/bastonetes, apresentando dimensões micrométricas e diferentes razões de aspecto. Observa-se ainda a ocorrência de partículas agrupadas e parcialmente sobrepostas, formando aglomerados. Em maiores ampliações, as partículas apresentam superfícies relativamente regulares e geometria bem definida, evidenciando um crescimento cristalino direcionado durante o processo hidrotérmico. Essa morfologia anisotrópica é coerente com a estrutura cristalina lamelar do α-MoO_3 identificada por DRX.

Em conjunto, os resultados de DRX e MEV indicam que a rota hidrotérmica empregada favoreceu a formação de α-MoO_3 cristalino com crescimento anisotrópico, produzindo partículas predominantemente alongadas e/ou em forma de placas.

Conclusão

A iniciação científica proporcionou um contato mais próximo com diferentes etapas da rotina de pesquisa, envolvendo tanto a parte experimental quanto a organização do laboratório. Durante esse período, foram acompanhadas atividades relacionadas à síntese e caracterização de materiais óxidos, permitindo observar na prática algumas das etapas envolvidas no desenvolvimento desses materiais.

Na parte científica, foram acompanhadas sínteses hidrotérmicas para a obtenção de Fe_3O_4 e MoO_3, desde o preparo dos precursores e a realização das sínteses até os

tratamentos posteriores das amostras. Também houve contato com técnicas de caracterização como difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS). Essas análises permitiram compreender de forma mais clara como são avaliadas características estruturais, morfológicas e composicionais dos materiais obtidos.

Paralelamente, as atividades relacionadas à organização do laboratório envolveram o levantamento, identificação, separação e organização dos reagentes químicos utilizados na rotina experimental. Nesse processo, também foram levantadas informações sobre os produtos, suas propriedades, formas de armazenamento e possíveis condições de controle, incluindo a consulta à legislação aplicável a determinados reagentes.

A experiência permitiu perceber que a pesquisa experimental não está limitada apenas à realização das sínteses e análises. A organização dos reagentes, o acompanhamento das quantidades disponíveis e a atenção às condições de armazenamento e controle também fazem parte da rotina do laboratório e são importantes para que os experimentos possam ser realizados de maneira adequada e segura.

Assim, as atividades desenvolvidas contribuíram para uma visão mais ampla da rotina de pesquisa, reunindo conhecimentos relacionados à síntese e caracterização de materiais com aspectos de organização e controle laboratorial. Esse contato com diferentes etapas do trabalho também foi importante para compreender melhor a relação entre a parte experimental e a organização necessária para o desenvolvimento das atividades de pesquisa.

Referências

DARR, Jawwad A.; ZHANG, Jingyi; MAKWANA, Neel M.; WENG, Xiaole. Continuous hydrothermal synthesis of inorganic nanoparticles: applications and future directions. Chemical Reviews, v. 117, n. 17, p. 11125–11238, 2017. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00417.

TAZIM, Tasnimul Quader; KAWSAR, Md.; HOSSAIN, Md. Sahadat; BAHADUR, Newaz Mohammed; AHMED, Samina. Hydrothermal synthesis of nano-metal oxides for structural modification: a review. Next Nanotechnology, v. 7, 100167, 2025. DOI: 10.1016/j.nxnano.2025.100167.

BRASIL. Lei nº 10.357, de 27 de dezembro de 2001. Estabelece normas de controle e fiscalização sobre produtos químicos que direta ou indiretamente possam ser destinados à elaboração ilícita de substâncias entorpecentes, psicotrópicas ou que determinem dependência física ou psíquica, e dá outras providências. Brasília, DF, 2001.

BRASIL. Ministério da Justiça e Segurança Pública. Portaria MJSP nº 204, de 21 de outubro de 2022. Estabelece procedimentos para o controle e a fiscalização de produtos químicos e define os produtos químicos sujeitos a controle pela Polícia Federal. Brasília, DF, 2022.

BRASIL. Ministério da Justiça e Segurança Pública. Instrução Normativa DG/PF nº 338, de 29 de julho de 2026. Disciplina as atividades de controle e fiscalização dos produtos químicos sujeitos ao controle da Polícia Federal. Brasília, DF, 2026.

BRASIL. Decreto nº 10.030, de 30 de setembro de 2019. Aprova o Regulamento de Produtos Controlados. Brasília, DF, 2019.

CÓDIGO: ET1643

AUTOR: GUSTAVO MEDEIROS LOPES

COAUTOR: FELIPE FERNANDES DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: MIRIAM KARLA ROCHA

TÍTULO: PRODUTO DIGITAL PARA APOIAR A TOMADA DE DECISÕES ECONÔMICAS E FINANCEIRAS

Resumo

A logística rodoviária brasileira lida com infraestrutura precária e altos custos. Embora essenciais, sistemas comerciais de roteirização (TMS) impõem altas barreiras financeiras. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um Produto Mínimo Viável (MVP) de roteirização multicritério, voltado à otimização logística e ao apoio à decisão financeira. Sob uma abordagem quantitativa aplicada em Python, a ferramenta utiliza dados geográficos do OpenStreetMap e a API do OpenRouteService. O código resolve o Problema do Caixeiro Viajante (TSP) para ordenar múltiplas paradas e adapta o Algoritmo de Dijkstra. Distanciando-se de cálculos limitados à menor distância, o algoritmo aplica um modelo de penalidades que pondera a qualidade do pavimento, viabilidade para veículos pesados e existência de pontos de apoio. Os resultados atestam a eficácia das rotas geradas, validadas via benchmarking com navegadores globais de mercado. Além da navegação, o sistema inclui um módulo econômico que compara o custo de combustíveis fósseis contra o Gás Natural Veicular (GNV). Conclui-se que a solução é robusta e viável, democratizando o acesso tecnológico a operações eficientes e à logística verde.

Palavras-chave: Otimização Logística. Produto Mínimo Viável. Logística Verde.

TITLE: DIGITAL PRODUCT TO SUPPORT ECONOMIC AND FINANCIAL DECISION-MAKING

Abstract

Brazilian road logistics deals with poor infrastructure and high costs. Although essential, commercial routing systems (TMS) impose high financial barriers. This paper presents the development of an open-source, multicriteria routing Minimum Viable Product (MVP) aimed at logistics optimization and financial decision support. Under an applied

quantitative approach in Python, the tool uses geographic data from OpenStreetMap and the OpenRouteService API. The code solves the Traveling Salesman Problem (TSP) to order multiple stops and adapts Dijkstra's Algorithm. Moving away from standard shortest distance calculations, the algorithm applies a penalty model that weighs pavement quality, feasibility for heavy vehicles, and the existence of support points. Results prove the effectiveness of the generated routes, validated via benchmarking against global market navigators. In addition to navigation, the system includes an economic module comparing the cost of fossil fuels against Vehicular Natural Gas (VNG). It is concluded that the solution is robust and viable, democratizing technological access to efficient operations and green logistics.

Keywords: Logistics Optimization. Minimum Viable Product. Green Logistics.

Introdução

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a logística é marcada por uma profunda dependência do modal rodoviário, que desempenha um papel vital no escoamento da produção nacional e na integração de mercados internos e externos. Considera-se que este modal seja responsável por aproximadamente 61,1% do volume total de carga transportada no país (Silva Filho; Silva, 2025). Sob a ótica econômica, essa matriz de transportes é estratégica para o desenvolvimento nacional, representando cerca de 7% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro (Costa, 2010).

Ainda que relevante, o setor enfrenta gargalos infraestruturais crônicos que limitam a eficiência operacional e a competitividade das organizações. De acordo com dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de 2018, a maior parte das rodovias brasileiras não é pavimentada, correspondendo a 78,5% da malha total. Mesmo em trechos pavimentados, as condições de conservação apresentam deterioração; em 2022, cerca de 66% da extensão avaliada foi classificada como regular, ruim ou péssima (CNT, 2022). Esse dado reflete-se diretamente no balanço financeiro, uma vez que pavimentos deficientes geram um acréscimo médio de 33,1% no custo operacional do transporte rodoviário (Silva Filho; Silva, 2025).

Simultaneamente aos desafios estruturais, o impacto ambiental e a busca por alternativas sustentáveis tornaram-se pontos centrais na agenda logística. O setor de transporte é responsável por 38% das emissões brasileiras de gases de efeito estufa (GEE) relacionadas à matriz energética, com caminhões e automóveis figurando como as principais fontes emissoras (Potenza, 2023). Nesse contexto, o Gás Natural Veicular (GNV), especialmente em sua vertente renovável (bio-GNV), surge como uma alternativa sustentável e economicamente vantajosa para a mobilidade, sendo considerado um dos combustíveis veiculares mais promissores por reduzir as emissões de CO2 em comparação aos combustíveis fósseis e apresentar alta viabilidade financeira para frotas de transporte (Khan et al., 2017; Xian et al., 2015).

Para manejar a complexidade das operações e mitigar os altos custos, o uso de sistemas de roteirização tornou-se indispensável no planejamento logístico. O mercado brasileiro conta com diversas empresas prestadoras desses serviços digitais, citando-se como exemplos a Nstech, TOTVS, Senior, Sascar e Cobli. Contudo, a aquisição, implantação e manutenção de licenças comerciais, como os Sistemas de Gerenciamento de Transporte (TMS), envolvem custos consideráveis. Tais soluções podem demandar desde centenas de reais mensais, até dezenas de milhares de reais na implementação de sistemas integrados (TOTVS, 2025). Essa barreira de custo compromete a acessibilidade dessas ferramentas para um público amplo, restringindo a otimização de rotas a transportadoras de grande porte e excluindo motoristas autônomos ou pequenas empresas. Portanto, a necessidade de ferramentas precisas, acessíveis e capazes de promover o acesso a rotas ideais é uma demanda latente.

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um programa roteirizador estruturado como um Produto Mínimo Viável (MVP), o qual passou por um rigoroso processo de evolução e desenvolvimento. Esse estudo partiu de versões preliminares de um programa que se restringia ao cálculo de trajetos simples de origem até um único destino, no qual seu código-fonte foi alterado para permitir a definição dinâmica de múltiplas rotas contendo diversas paradas intermediárias (sequenciadas logicamente) fixadas entre uma origem e um destino final. A ferramenta oferece amplas opções de escolha, permitindo que o usuário selecione parâmetros individuais de preferência de rota (como melhor qualidade de pavimento ou compatibilidade com veículos pesados). Adicionalmente, o sistema entrega um módulo de cálculo financeiro, permitindo comparar o consumo e o custo de combustíveis convencionais frente ao GNV, subsidiando a tomada de decisão logística e econômica.

Metodologia

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a concepção deste protótipo se enquadra como uma pesquisa aplicada, dado que seu propósito central transcende a teoria pura e foca ativamente na construção de uma solução (o MVP) para resolver os problemas práticos de otimização logística e infraestrutura (Silva Filho; Silva, 2025). A abordagem pauta-se no escopo quantitativo, estando os motores de cálculo da ferramenta fundamentados matematicamente na Teoria dos Grafos e nos modelos computacionais de Pesquisa Operacional (PO) voltados para a busca de caminhos mínimos (Oliveira et al., 2021). O desenvolvimento seguiu um ciclo estritamente iterativo e incremental; o código-fonte foi estruturado modularmente com o auxílio de Modelos de Linguagem de Grande Escala (LLMs) e sistematicamente refinado mediante sucessivos testes empíricos de otimização lógica.

A ferramenta foi inicialmente concebida com base nos seguintes pré-requisitos estabelecidos, que serviram pra guiar o design e o desenvolvimento dela:

• A definição da liguagem de programação (python);

• Estar disponível abertamente (open source);

• Apresentar relevância prática para a sociedade e para a indústria;

• Ter a capacidade de calcular e realizar a comparação de diferentes opções com base em múltiplos critérios.

Com os requisitos balizados, a prototipagem evoluiu a partir de experimentações rudimentares no PyCharm e Jupyter Notebook para uma implantação em nuvem. Fortemente apoiada pelos LLMs para o debug e refatoração, a abordagem iterativa provou-se altamente eficiente, uma vez que o software foi edificado aditivamente, e cada nova função passou por validações até que a aplicação atingisse plena funcionalidade para o usuário final.

O projeto de roteirização multicritério, em suas fases de desenvolvimento iniciais (versões 1.0 e 2.0), representou um grande passo metodológico, porém apresentava severas restrições. O sistema anterior era limitado ao cálculo de rotas simples entre apenas dois pontos isolados (A e B). Além disso, para processar geograficamente a malha viária, a aplicação necessitava extrair uma imensa caixa delimitadora global (bounding box) envolvendo toda a área entre os pontos. Esse formato causava corriqueiros “vazamentos de memória” e excedia os limites temporais de requisição na comunicação com a API pública do Overpass. Outro entrave ocorria na própria arquitetura do sistema, antes baseada em microsserviços, o que gerava perda de desempenho devido à latência de rede entre os módulos. Para contornar esses gargalos, as atualizações culminaram em um sistema coeso batizado de "Cálculão". A ruptura técnica ocorreu na migração do modelo de microsserviços para um modelo monolítico unificado, onde os serviços lógicos de roteamento rodam intrinsicamente no mesmo processo em Python. No aspecto funcional, a ferramenta adquiriu o suporte para o cálculo de múltiplas paradas (waypoints). Para orquestrar o sequenciamento eficiente desses pontos, o programa agora soluciona a variação do Problema do Caixeiro Viajante (TSP - Traveling Salesperson Problem) efetuando chamadas diretas e automatizadas à API do serviço OpenRouteService (ORS).

Para atestar a validade da solução proposta e a eficiência computacional dos trajetos gerados pelo algoritmo construído, foi realizado um estudo de benchmarking comparativo. A rota consolidada pelo MVP foi confrontada sob os mesmos parâmetros e endereços contra as rotas delineadas por softwares globais amplamente difundidos no mercado, especificamente o Google Maps e o Apple Maps. Este método de validação cruzada garantiu que a geometria e as métricas propostas pelo programa apresentassem alto rigor científico e confiabilidade espacial.

Resultados e Discussões

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Sistemas de Roterização e sua importância

Os sistemas de roteirização concebidos para solucionar variações do Problema de Roteamento de Veículos VRP (Vehicle Routing Problem), são ferramentas matemáticas e computacionais dedicadas a determinar a atribuição ideal e o sequenciamento de rotas para frotas de transporte sob restrições físicas e operacionais (Liu, 2023). Eles consolidam-se como tecnologias estratégicas para a gestão logística e o bom desempenho da cadeia de suprimentos, impactando diretamente a competitividade das organizações e sustentando pilares econômicos e ambientais (Maque Roncalla et al., 2024).

No Brasil, esses sistemas ganham maior importância devido à forte dependência do modal rodoviário e aos crônicos desafios de conservação da malha viária (Silva Filho; Silva, 2025). Além de contornar engarrafamentos e reduzir o tempo improdutivo ao volante, o roteamento eficiente atua como um preceito da "logística verde" (Wang et al., 2019). Ao encontrar distâncias adequadas e sistematicamente desviar de vias com pavimentação precária, o planejamento previne a manutenção corretiva precoce e mitiga drasticamente a queima ociosa de combustíveis. Consequentemente, ao integrar e quantificar distâncias e perfis de estrada, os sistemas de roteirização avançados viabilizam comparações financeiras diretas, ilustrando, por exemplo, o ganho de capital proporcionado pela transição sustentável ao gás biometano (bio-GNV). A referida adoção é apontada como uma manobra chave para a descarbonização das frotas, uma vez que motores movidos a este gás abatem até 80% das emissões de dióxido de carbono (CO2) em contraste aos motores movidos a diesel (Khan et al., 2017; Xian et al., 2015).

3.2 Funcionamento da Ferramenta

Para que o cálculo computacional das diversas rotas alternativas seja aplicável e fiel à realidade das ruas, torna-se imperativo a alimentação do sistema com dados geográficos atualizados e consistentes. Dessa maneira o geoprocessamento viabiliza esse planejamento por meio da extração e manipulação de informações espaciais de plataformas colaborativas, como o OpenStreetMap (OSM) (Camboin; Bravo; Sluter, 2019). A obtenção desses dados pode ser realizada através de interfaces como a API Overpass para a extração da geometria e a API Nominatim para geocodificação dos endereços escritos para coordenadas cartesianas, elas permitem capturar atributos técnicos essenciais das vias extraídas, incluindo dados de pavimento (smoothness), material das pistas (surface) e as regulamentações de fluxo e velocidade (Rocha et al., 2024).

Após a geocodificação das paradas, o sistema faz o sequenciamento de forma otimizada, caracterizando o clássico Problema do Caixeiro Viajante (TSP) (Bhattarai, 2024). Como a busca exaustiva para esse problema demanda um custo computacional exponencialmente inviável na prática (Bhattarai, 2024), adotou-se a API de otimização do OpenRouteService (ORS) (Neis; Zipf, 2008). Operando sob o motor heurístico VROOM (Lozano Murciego et al., 2020), a API processa as coordenadas e devolve a ordem ideal de visitação. Essa abordagem reordena os nós, evita trajetos sobrepostos e garante a formação do melhor alinhamento lógico antes mesmo do início da extração geométrica das vias.

A partir dessa sequência ordenada, inicia-se a roteirização física entre as paradas. A malha rodoviária extraída do OSM é modelada computacionalmente na forma de um grande grafo direcionado, no qual os cruzamentos físicos representam os vértices (nós) e os trechos de ruas são definidos como as arestas. O princípio adotado para navegar essa “teia

de grafos" é o Algoritmo de Dijkstra, uma técnica de busca gulosa (greedy) reverenciada na Pesquisa Operacional por encontrar inequivocamente os caminhos mínimos explorando progressivamente os conjuntos de nós adjacentes (Gbadamosi; Aremu, 2016). Possuindo uma eficiência computacional descrita pela complexidade O(|E| · log |V|) (Jonker; Volgenant, 1987), ele lida facilmente com milhares de ruas simultâneas. A grande inovação desta aplicação recai no uso modificado do Algoritmo de Dijkstra. Ao invés de julgar os "caminhos mais curtos" considerando apenas o metro corrido da via, o programa substitui o peso fixo da distância por um "custo punitivo", gerado através da Equação 1. O gestor define um dos critérios operacionais e o algoritmo automaticamente desvia de vias rurais ou sem infraestrutura, resultando no percurso mais estratégico possível. O fluxo operacional do sistema e suas APIs pode ser acompanhado graficamente pela Figura 1.

3.3. Fórmula Geral de Pontuação

A definição de cada segmento da rota "ideal" é estabelecida por meio de um modelo de otimização que quantifica a inadequação das vias utilizando um sistema de pontuação punitiva. O custo total de cada aresta do grafo é determinado pelo produto da distância do segmento pelos fatores de penalização associados a critérios operacionais específicos. Os critérios analisados compreendem: tipo de via, superfície, suavidade e pontos de apoio próximos. Matematicamente, o cálculo do peso de cada aresta é definido pela Equação 1.

3.4. Atributos dos grafos

O grafo instanciado por meio do processamento dos dados do Overpass traz consigo uma miríade de metadados agregados nele, para cada aresta, sendo os principais atributos utilizados pelo sistema detalhados a seguir na Tabela 1.

Destes, os atributos essenciais que guiam o crivo do algoritmo são o highway, surface e smoothness. Eles formam a tríade da função de penalidade da matriz. Como ilustrado na Tabela 2, pavimentações precárias ou pistas degradadas recebem números punitivos altos, informando ao Dijkstra que transitar ali demandará um "alto custo", o forçando a ignorar as vias em mau estado.

Quanto ao critério de rota de "Maior Assistência", o sistema executa uma análise espacial secundária em paralelo para assegurar maior suporte ao condutor. O programa calcula o centroide de cada aresta e levanta a existência de pontos de interesse (POIs), no caso, postos de combustíveis e oficinas contidos sob um raio de 500 metros em volta do centro dessa aresta. A verificação inteligente desses distanciamentos reais ocorre através de buscas de vizinhança apoiadas pela estrutura KDTree, da biblioteca Python SciPy, processando matrizes e coordenadas convertidas em radianos com agilidade equivalente à O(log N). Rodovias ladeadas por postos recebem pontuação bonificada, com um desconto no custo da aresta, encorajando a passagem com maior assistência, essa pontuação bônus foi denotada na Tabela 3.

3.5. Definição dos multiplicadores

Os multiplicadores atuam como sintonizadores que definem a prioridade de cada atributo matemático no cálculo final da rota. Eles permitem que o algoritmo de Dijkstra não

busque apenas o caminho mais curto, mas o mais eficiente segundo o perfil do critério escolhido pelo usuário, conforme detalhado na Tabela 4.

a) Mais Rápida: Prioriza a menor distância pelo tempo, mantendo multiplicadores de pavimentação baixos e zerando o fator de segurança;

b) Melhor Pavimento: Aplica multiplicadores elevados para superfície e suavidade, forçando o algoritmo a desviar de vias de terra ou mal conservadas para preservar o veículo;

c) Maior Assistência: Eleva o multiplicador de assistência, garantindo que a rota prioritária passe por trechos assistidos por pontos de interesse (POIs), nesse caso, postos e oficinas;

d) Caminhão: Além de multiplicadores que favorecem vias estruturadas, este critério aplica um filtro de exclusão absoluta, removendo do grafo arestas com restrições de altura, peso ou proibição legal para veículos pesados (HGV=no).

Para ilustrar de forma prática o funcionamento do algoritmo de ponderação de arestas, simulou-se o cálculo do custo final sob dois perfis paralelos em duas arestas hipotéticas de mesma distância (1 Km) apresentadas na Tabela 5.

Aplicando os pesos da Equação 1, no critério "Mais Rápido", os custos para as arestas foram aferidos abaixo.

No critério “Mais Rápido”, o peso para as arestas A e B são 1,2 e 3,9 reespectivamente.

Já no critério “Melhor Pavimento”, o peso para as arestas A e B são 1,13 e 17,25 reepectivamente.

Os resultados demonstram numericamente que o algoritmo atua com uma grande margem de proteção. Na prática, a ferramenta determina que é mais vantajoso desviar o trajeto em até 15,2 km por rodovias asfaltadas do que o fazer trafega-lo por 1 Km de estrada de terra.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS E DEMONSTRAÇÃO

4.1. Interface do Usuário e Comparativo de Resultados

Para validação da ferramenta desenvolvida, ela foi submetida a um cenário de teste, verificação e validação com um caso de roteirização específico. Assim, estruturou-se um ensaio logístico, centrado no transporte de uma Instituição de Ensino. Simulou-se que a UFRN necessitaria estipular um trajeto de viagem fechado capaz de transportar discentes e professores utilizando um de seus ônibus da frota ao longo de diversas instituições de ensino e pesquisa (paradas) dentro da zona metropolitana de natal e zonas circunvizinhas, com a parada final sendo o retorno ao campus central. Para isso, foi considerada a dimensões do veículo com 5 metros de altura e peso de 20 toneladas. O planejamento exigia abarcar as zonas da Grande Natal e arredores sob as seguintes paradas sequenciadas pelo próprio algoritmo de otimização do motor VROOM:

HUOL - Petrópolis, Natal;
Escola de Odontologia - Lagoa Nova, Natal;
SENAI - Lagoa Nova, Natal;
UERN - Potengi, Natal;
Escola Agrícola de Jundiaí (EAJ) - Macaíba;
Instituto Edmond e Lily Safra - Zona Rural, Macaíba;
Departamento de Oceanografia (DOL) - Mãe Luíza, Natal.

A interface do protótipo possibilita inserir toda a sequência, como evidenciado na inserção dos dados textuais e parâmetros de rota na Figura 2.

Após a inserção dos parâmetros pelo usuário, o sistema executa as rotinas de backend, processando a geocodificação de cada endereço e solucionando o Problema do Caixeiro Viajante (TSP) para definir a ordem ótima de visitação. A Figura 3 ilustra o retorno dessa etapa de processamento, apresentando o sequenciamento lógico das paradas, a distância total calculada para o trajeto e alertas identificados ao longo da via.

O processamento final resulta na renderização do percurso em um mapa interativo. Conforme exposto na Figura 4, a biblioteca cartográfica interativa Folium projeta os nós otimizados pelo algoritmo sobre o mapa base. O resultado evidencia um circuito logístico traçado perfeitamente.

Além da geometria da rota, o MVP entrega uma análise econômica detalhada. A Figura 5 demonstra o módulo de custos financeiros, que quantifica e compara automaticamente a estimativa de gastos. O sistema calcula o impacto financeiro do consumo do combustível em contraste direto com a adoção do Gás Natural Veicular (GNV) para a quilometragem exata do trajeto delineado.

Para subsidiar a tomada de decisão do gestor, a Figura 6 detalha esses relatórios de consumo. O painel exibe métricas precisas como o rendimento de km/L e km/m³, e entrega o valor monetário absoluto de economia proporcionado pela transição energética.

Por fim, visando a aplicabilidade prática da operação de transporte, a Figura 7 ilustra a interface de exportação. O sistema permite o descarregamento imediato da rota otimizada em formato .GPX para integração nativa com hardwares de navegação veicular (GPS), bem como a visualização dos dados brutos retornados pela API em formato JSON.

4.2 Comparativo de Resultados

Com o intuito de aferir não só a eficácia do sequenciamento lógico, mas também atestar a validade espacial do trajeto otimizado pelo MVP, realizou-se um benchmarking comparativo contra plataformas de navegação globalmente consolidadas. O ensaio metodológico consistiu em submeter as exatas coordenadas geográficas do circuito avaliado aos programas de roteirização do Google Maps e do Apple Maps. Essa etapa buscou validar o grau de divergência das métricas geradas, notadamente a distância total e o perfil do percurso, para validar a precisão geométrica e a robustez da ferramenta proposta.

A Figura 8 evidencia a precisão e correspondência dos dados gerados em comparação com outros softwares comercialmente consolidados. A simulação comprova que,

submetidos às mesmas paradas, o programa estabeleceu um traçado coerente, eficaz e de menor distância (84 Km), o menor em comparação aos 85 Km do Google Maps, e os 100 km do Apple Maps. Além de convergir simetricamente com a via gerada pelos programas líderes do mercado. Assim, o distanciamento real se dá, contudo, no filtro paramétrico, ao contrário dos mapas comerciais genéricos, o MVP operou o cálculo estritamente garantindo que nenhuma estrutura irregular dentro do percurso traçado pudesse afetar o veículo de dimensões descritas, garantindo conformidade operacional para o usuário.

Conclusão

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve êxito em seus objetivos norteadores, comprovando a viabilidade computacional e prática do desenvolvimento de um sistema de roteirização multicritério construído como Produto Mínimo Viável (MVP). A ferramenta provou estar capacitada para análise de rotas para empresas que exigem planejamento de escoamento e frota com base em regras operacionais especificas, superando os métodos tradicionais ancorados principalmente na menor distância. Ao elaborar um código Python robusto e centrado em parâmetros relevantes, a solução demonstrou possuir capacidade e flexibilidade suficientes para contornar a precária realidade da matriz de transporte viário brasileiro.

Sob a ótica mercadológica e socioeconômica, a estrutura livre e de código aberto apresentada é uma inovação disruptiva contra as barreiras de entrada elevadas para pequenas empresas. Em um contexto dominado por softwares TMS proibitivos, o produto desenvolvido no estudo oferece às cadeias logísticas uma ferramenta estratégica inestimável. Transportadores individuais, frotas governamentais, e operadores independentes do transporte de carga ou fretes que se veem sem margem financeira para adotar softwares comerciais, agora podem ser assegurados, ganhando autonomia para evitar o desperdício em longos desvios a capacidade de comparar de forma fácil o peso dos combustíveis tradicionais ante as transições limpas.

Apesar da escalabilidade e dos resultados atestados via benchmarking, reconhece-se limites inerentes à camada de infraestrutura gratuita e aberta, que ancora o projeto. Nota-se restrições oriundas diretamente do limite (rate-limiting) imposto pela API do Overpass para requisições volumosas de ruas e, similarmente, entraves dinâmicos referentes às tabelas de preço de combustíveis da ANP, extraídas em regimes semanais, dificultando a assimilação de flutuações diárias deles. Adicionalmente, por se tratar de um modelo monolítico unificado, processar o № de paradas do problema TSP conjugado a grafos densos de centenas de vias urbanas atrela um consumo considerável de memória por parte do provedor. À medida que o transportador adiciona mais escalas simultâneas no frontend, o tempo de extração do mapa requer maior poder computacional, deixando a performance refém da máquina virtual e planos de hosting gratuitos.

Referências

AUTORES. Programa de roteirização multicritério. 2026. Disponível em: https://github.com/GustavoMedeirosL/GPS3.0.git. Acesso em: 30 agosto 2026.

BHATTARAI, S. Traveling Salesman Problem. Nepal Journals Online, v. 1, 2024. Disponível em: https://www.nepjol.info/index.php/sra/article/view/74286.

CAMBOIM, J.; BRAVO, J.; SLUTER, C. Avaliação da qualidade de dados do OpenStreetMap. Curitiba: UFPR, 2019.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation. 7. ed. New York: Pearson, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2022: Relatório Gerencial. Brasília, DF: CNT, 2022.

COSTA, F. Logística: um elemento estratégico para a economia. Rio de Janeiro, 2010.

GBADAMOSI, A.; AREMU, D. Application of Dijkstra's Algorithm in Route Planning. Journal of Information Systems, v. 14, p. 45-56, 2016.

JONKER, R.; VOLGENANT, A. A shortest augmenting path algorithm for dense and sparse linear assignment problems. Computing, v. 38, p. 325-340, 1987.

KHAN, M. et al. Biomethane potential and environmental impacts of Natural Gas in the transport sector. Applied Energy, v. 195, p. 37-46, 2017.

LIU, F. Heuristics for Vehicle Routing Problem: A Survey and Recent Advances. arXiv preprint arXiv:2303.04147, 2023.

LOZANO MURCIEGO, Á.; JIMÉNEZ-BRAVO, D. M.; PATO MARTÍNEZ, D.; VALERA ROMÁN, A.; LUIS LAZO, G. Voice Assistant and Route Optimization System for Logistics Companies in Depopulated Rural Areas. Sustainability, v. 12, n. 13, p. 5377, 2020. DOI: 10.3390/su12135377.

MAQUE RONCALLA, J. et al. Impacts of Vehicle Routing on Sustainability and Supply Chain Strategy. Journal of Logistics Management, 2024.

NEIS, P.; ZIPF, A. OpenRouteService.org is three times "Open": Combining OpenSource, OpenLS and OpenStreetMaps. GIScience, Heidelberg University, 2008.

OLIVEIRA, T. et al. Aplicações de Pesquisa Operacional e Grafos no Planejamento Logístico. Revista de Produção, v. 20, p. 110-125, 2021.

POTENZA, R. Inventário de Emissões GEE do Setor de Transportes do Brasil. SEEG, 2023.

ROCHA, M. et al. Geocodificação e extração de atributos rodoviários via API Overpass. Anais do Simpósio de Tecnologias, 2024.

SILVA FILHO, L.; SILVA, A. Infraestrutura Rodoviária no Brasil: Impactos e Custos Operacionais. São Paulo, 2025.

TOTVS. Total Cost of Ownership (TCO): o que é e como calcular. Portal TOTVS, 2025. Disponível em: https://www.totvs.com/blog/gestao-logistica/total-ownership-cost/.

WANG, Y. et al. Green Logistics: Reducing Fuel Consumption via Route Optimization. Transportation Research Part E, v. 121, p. 1-18, 2019.

XIAN, Y. et al. Environmental Benefits of Bio-CNG for Heavy-Duty Vehicles. Environmental Science & Technology, v. 49, p. 28-36, 2015.

Anexos



t1



t2



t3



t4



t5



t6



t7

CÓDIGO: ET1653

AUTOR: LEONARDO MACHADO MOREIRA

COAUTOR: MATTEO PEIXOTO

COAUTOR: VICENTE ANGELO DE SOUSA JUNIOR

COAUTOR: NELSON ION DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: AUGUSTO JOSE VENANCIO NETO

TÍTULO: Monitoramento do ciclo de vida de aplicações elásticas entregues por Cloud-Network Slices

Resumo

Este trabalho propõe um sistema de monitoramento transcamada para avaliar o desempenho do Minecraft — jogo sandbox sensível a atraso — sobre uma infraestrutura 5G NR real end-to-end com acesso sem fio fixo (FWA). O testbed integra um núcleo 5G privado (5GC) hospedando um servidor PaperMC gerenciado pelo controlador Crafty, e um gNB conectado a um dispositivo FWA que fornece acesso Wi-Fi a headsets Meta Quest 3. A carga de trabalho combina três bots Mineflayer com um a três headsets usados simultaneamente por jogadores. Um framework automatizado correlaciona KPIs de rede (throughput, RTT e jitter) com métricas de QoS da aplicação (ticks por segundo e duração do tick). A principal novidade é a sincronização entre rastros sem fio de baixo nível e dados de desempenho do motor de jogo de alto nível em ambiente 5G FWA. A contribuição é um framework robusto de avaliação para serviços sensíveis a atraso, que valida a viabilidade do 5G FWA como conectividade primária para jogos imersivos e identifica o impacto dos atrasos induzidos pela rede na experiência do jogador.

Palavras-chave: 5G, FWA, Minecraft, Meta Quest 3, QoE,QoS, KPIs

TITLE: Monitoring the lifecycle of elastic applications delivered by Cloud-Network Slices

Abstract

This work proposes a cross-layer monitoring system to evaluate the performance of Minecraft — a delay-sensitive sandbox game — over a real end-to-end 5G NR infrastructure using fixed wireless access (FWA). The testbed integrates a private 5G core (5GC) hosting a PaperMC server managed by the Crafty controller, and a gNB

connected to an FWA device that provides Wi-Fi access for Meta Quest 3 headsets. The workload combines three Mineflayer bots with one to three headsets used simultaneously by players. An automated framework correlates network KPIs (throughput, RTT, and jitter) with application-specific QoS metrics (ticks per second and tick duration). The main novelty is the synchronization of low-level wireless network traces with high-level game engine performance data within a 5G FWA environment. The contribution is a robust evaluation framework for delay-sensitive services, validating the feasibility of 5G FWA as a primary connectivity bridge for immersive gaming and identifying the impact of network-induced delays on player experience.

Keywords: 5G, FWA, Minecraft, QoE, Meta Quest 3,minecraft-prometheus-exporter

Introdução

O ecossistema do 5G New Radio (NR) foi concebido para atender requisitos que se estendem além das altas taxas de transmissão, permitindo assim serviços emergentes como a realidade estendida (XR). A XR é um termo abrangente que engloba realidade virtual (VR), realidade aumentada (AR) e realidade mista (MR), que integram fluidamente ambientes físicos e digitais. O mercado de XR, avaliado em US$ 142,39 bilhões em 2023, projeta-se crescer significativamente (US$ 1,069 bilhão em 2030 [1] e US$ 2,127,81 bilhões em 2034 [2]), impulsionado por investimentos substanciais nos setores automotivo, de jogos e entretenimento [3]–[6]. Entre eles, jogos sandbox altamente interativos como o Minecraft se destacam como aplicações demandantes que requerem latência ultrabaixa e alta confiabilidade para manter a imersão do jogador e a sincronização em um mundo digital compartilhado. Apesar de seu potencial, a implantação generalizada de serviços de XR em redes móveis permanece desafiadora devido à natureza instável do meio sem fio [7]. Aplicações de RV interativas, como jogos imersivos, impõem requisitos rigorosos de qualidade de serviço (QoS); por exemplo, latências superiores a 20 ms podem comprometer a experiência e levar a enjoo ou perda de interatividade [8]–[10]. Redes comerciais 4G frequentemente não conseguem atingir esses limiares, tornando infraestruturas 5G personalizadas essenciais para prover o isolamento e desempenho necessários [8].
Além disso, displays comerciais populares montados na cabeça (HMDs), como o Meta Quest 3, atualmente não possuem suporte nativo à conectividade celular, criando uma lacuna significativa para a adoção móvel de XR [9], [10].
Para preencher essa lacuna de conectividade, o acesso sem fio fixo (FWA) emergiu como uma solução primária, atuando como um ponto de acesso Wi-Fi com conectividade 5G para integrar dispositivos de RV na rede móvel. Embora estudos

recentes tenham explorado a viabilidade de transmissão de vídeo em 360 graus sobre FWA 5G [7], [11], [12], o desempenho de jogos multiplayer em tempo real, onde o estado do mundo deve ser sincronizado entre vários usuários, permanece uma área crítica de pesquisa. Especificamente, o enlace ascendente frequentemente torna-se um gargalo significativo ao multiplexar atualizações frequentes de pose e comandos do jogador de vários usuários simultâneos [12]. Este estudo apresenta uma análise de desempenho do Minecraft operando sobre uma infraestrutura real de acesso sem fio fixo (FWA) 5G ponta-a-ponta (E2E). O ambientes de teste experimental proposto hospeda um servidor Minecraft dentro de um núcleo privado 5G (5GC), entregando o serviço via um gNodeB (gNB) para um dispositivo FWA que fornece conectividade para um a três jogadores usando headsets Meta Quest 3 simultaneamente. A avaliação utiliza um framework automatizado inovador que correlaciona Indicadores de Desempenho Chave da Rede (KPIs), como tempo de ida e volta (RTT) capturado via script Tshark, com métricas de qualidade da experiência (QoS) no nível da aplicação, como ticks por segundo (TPS), extraídas através do plugin minecraft-prometheus-exporter. As principais contribuições deste trabalho são:

• Projeto e implementação de uma plataforma de teste E2E 5G real baseada em tecnologias de código aberto para suportar jogos imersivos multiusuário.
• Validação do 5G FWA como uma ponte de conectividade para múltiplos headsets Meta Quest 3, superando a falta de suporte nativo 5G.
• Introdução de uma metodologia de monitoramento cruzado de camadas automatizada que sincroniza a coleta de KPIs de rede de baixo nível com métricas específicas do motor de jogo via o plugin minecraft-prometheus-exporter.
• Avaliação experimental do impacto multiusuário (de 1 a 3 jogadores simultâneos e 3 bots Mineflayer) na estabilidade da rede e na experiência resultante do jogador em ambientes sandbox sensíveis à latência.

Metodologia

O testbed é uma rede 5G privada end-to-end que integra 5GC, gNB e um gateway FWA para conectar headsets VR. O servidor Minecraft roda no mesmo host físico do núcleo 5G, decisão tomada para minimizar a latência de transporte.

Infraestrutura e serviço. O núcleo 5G usa Open5GS v2.7.0 sobre Ubuntu Server 22.04, orquestrado com Docker, hospedando o Crafty Controller v4, que gerencia um servidor Paper MC v1.21.5 (JRE/JDK 21+). O suporte a VR vem dos plugins Vivecraft Spigot

Extension e FlyCraft, este último responsável por regular a velocidade de voo dos jogadores. O RAN emprega srsRAN v25.04 com uma USRP B210 configurada em 51 PRBs, 20 MHz, faixa de 3740–3760 MHz, MIMO 2x2 e 256-QAM. O gNB se conecta a um gateway FWA TP-Link NX620v, que fornece Wi-Fi aos headsets Meta Quest 3 rodando QuestCraft v6.0.0. Um Motorola Moto G50 5G atua como UE nos testes de caracterização.

Framework de monitoramento. A coleta é centralizada em um dashboard Grafana 13.1.3, alimentado por três agentes: Prometheus 3.13.2 na camada de aplicação, Zabbix Agent 7.2.15 para desempenho do 5GC e um coletor nativo de KPIs de RAN. O Crafty Controller expõe endpoints Prometheus com status do host e dos servidores. No Paper MC, o plugin minecraft-prometheus-exporter (v3.1.2) coleta TPS, tick duration e métricas de chunks, enquanto o prometric (v0.1.0) mede o ping por jogador. No 5GC, scripts Python acionados via Zabbix geram telemetria JSON estruturada. O gNB envia streams UDP/JSON ao srsRAN Metrics Server v1.7.3, que persiste os dados em InfluxDB 2.7.12 para visualização no Grafana. Um script próprio, exportador_rede.js, mede RTT e throughput em nível de fio.

Geração automatizada de carga. O gerador bots.js, escrito em Node.js v20.20.2 com Mineflayer v4.25.0, simula múltiplos jogadores interagindo no mundo, permitindo medir o impacto da densidade de usuários sobre os KPIs de rede e a estabilidade do jogo.

A avaliação é dividida em dois conjuntos de experimentos.

Conjunto 1 — Caracterização do sistema. Caracteriza o desempenho da rede 5G subjacente para estabelecer limites superiores de throughput e limites inferiores de latência. Usa iperf3 para estimativa de throughput TCP e ping para medição de RTT. Duas configurações são comparadas, de modo a isolar a sobrecarga introduzida pela ponte FWA: (i) conectividade 5G direta, com o Moto G50 conectado diretamente ao gNB; e (ii) conectividade com ponte FWA, com o UE acessando o TP-Link NX620v por Wi-Fi. Cada configuração é testada em 10 repetições de 5 minutos, garantindo relevância estatística e captura de flutuações do meio sem fio.

Conjunto 2 — Cenário de jogos imersivos. Avalia o serviço Minecraft sob carga, usando o framework de monitoramento proposto. A carga combina três agentes bots.js com um a três operadores humanos em Meta Quest 3 com QuestCraft, formando três casos de teste independentes: 3 bots + 1 jogador VR, 3 bots + 2 jogadores VR e 3 bots + 3 jogadores VR. Para maximizar a carga sobre o motor Paper MC e sobre a rede, bots e jogadores executam tarefas de exploração — movimento contínuo por áreas não renderizadas do mapa a aproximadamente 21,78 blocos/s. Isso obriga o servidor a gerar e carregar novos chunks em tempo real, elevando o uso de CPU e a transmissão de dados. Para garantir consistência entre execuções, o estado do mundo é reiniciado antes de cada experimento, limpando o cache de chunks carregados. Cada caso de teste é repetido 3 vezes, com 10 minutos por execução.

Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados experimentais do nosso estudo, organizados em três subseções principais. Primeiramente, são apresentadas as funcionalidades e a visibilidade intercamadas do painel de monitoramento do framework proposto. Em seguida, o Conjunto de Experimentos 1 caracteriza o desempenho de linha de base da rede 5G, comparando a conectividade direta com a configuração FWA-bridged. Por fim, o Conjunto de Experimentos 2 analisa o impacto das cargas de trabalho multiusuário sobre as métricas do motor de jogo Minecraft e a experiência imersiva dos jogadores.

A. Painel de Monitoramento do Framework

O framework de monitoramento proposto, visualizado através do painel Grafana ilustrado na Fig. 4, atua como uma plataforma centralizada de observabilidade para todo o ecossistema 5G FWA, da infraestrutura de núcleo à experiência do usuário final. A interface foi arquitetada para fornecer visibilidade intercamadas, permitindo a correlação da saúde da infraestrutura, desempenho do rádio e QoS no nível de aplicação. O painel é organizado em três domínios funcionais primários:

1) Fig. 4(a) (métricas 5GC): Esta visão fornece telemetria em tempo real do Open5GS e do ambiente de hospedagem. Especificamente, ela rastreia a utilização de CPU e memória para contêineres de serviço críticos, incluindo o Crafty Controller, Prometheus e o próprio Grafana. Adicionalmente, ela exibe o throughput no nível do núcleo (bytes enviados e recebidos por segundo) para refletir a capacidade da infraestrutura backbone durante experimentos de jogos imersivos.

2) Fig. 4(b) (métricas gNB): Esta seção apresenta dados de RAN de alta fidelidade coletados da pilha de protocolo srsRAN. Os KPIs de telecomunicações incluem o número de UEs ativos, taxas de bits de uplink e downlink, e a utilização média do Esquema de Modulação e Codificação (MCS). Também incorpora telemetria de taxa de erro, tais como Taxa de Erro de Bloco no Enlace Descendente (BLER) e Relatórios de Status de Buffer (BSR), que são vitais para diagnosticar latências induzidas por sem fio ou perda de pacotes que podem originar-se nos segmentos 5G ou Wi-Fi.

3) Fig. 4(c) (métricas específicas do Minecraft): O domínio final foca na camada de serviço, utilizando métricas extraídas via o exporter sladkoff/minecraft-prometheus-exporter e os plugins prometric executados no Paper MC. Por exemplo, ela rastreia a TPS e a duração do tick/MSPT (tempo médio de processamento de estado).

A principal contribuição técnica deste painel é sua capacidade de sincronizar funcionalmente KPIs de rede de

baixo nível com o desempenho do motor de jogo de alto nível. Ao alinhar dados com carimbo de tempo provenientes do gNB e 5GC com a saúde interna da simulação do servidor Minecraft, o framework identifica exatamente como flutuações no meio de rádio 5G, como mudanças no MCS ou aumento do BSR, se traduzem em degradação na camada de aplicação, como uma queda na TPS.

B. Conjunto de Experimentos 1: Caracterização da Rede 5G

Para avaliar o impacto da infraestrutura FWA, realizamos uma análise comparativa entre a conectividade 5G direta (5G Only) e a implantação com ponte (5G FWA). A Fig. 5 ilustra esses resultados através da função de distribuição cumulativa (CDF) de throughput e medidas temporais de RTT.

(a) Throughput. (b) RTT.

Fig. 5: Caracterização do desempenho de linha de base do impacto da FWA no cenário comparado com apenas 5G (Motorola Moto G50 5G): (a) CDF de capacidade de throughput; (b) medidas temporais de RTT e valores médios.

A capacidade de throughput, mostrada na Fig. 5. (a), revela uma redução significativa quando o dispositivo FWA é introduzido. Essa lacuna de desempenho representa o custo de gateway para a conversão e encaminhamento necessários dos dados entre a interface 5G NR e o ponto de acesso Wi-Fi fornecido aos headsets de RV. Ao analisar o 50° percentil (mediana) das curvas de CDF, o throughput cai de aproximadamente 73 Mbps na configuração apenas 5G para cerca de 44 Mbps no cenário 5G FWA. Isso representa uma perda de throughput de aproximadamente 40% no nível da mediana.

(a) Métricas do 5GC. (b) Métricas da gNB. (c) Métricas Específicas do Minecraft.

Fig. 4: Ilustração do Painel de Monitoramento.

Um compromisso de desempenho semelhante é observado quanto à latência na Fig. 5. (b). Embora o enlace 5G direto mantenha um RTT médio estável de 27,38 ms, a introdução da ponte FWA aumenta o RTT médio para aproximadamente 39,04 ms (aproximadamente um aumento de 44%). Estes resultados indicam que, embora o FWA efetivamente preencha a lacuna de conectividade para dispositivos de RV não celulares como o Meta Quest 3, ele introduz uma sobrecarga mensurável tanto em largura de banda quanto em atraso que deve ser considerada em aplicações imersivas altamente sensíveis.

C. Conjunto de Experimentos 2: Cenário de Jogo Imersivo

A análise do cenário de jogo imersivo, representado na Fig. 6, demonstra a correlação entre o desempenho da rede e a estabilidade do motor de jogo à medida que a densidade de usuários aumenta de um para três jogadores VR (mais três bots automatizados).

Um tick é um ciclo de execução fundamental do loop do jogo do lado do servidor do Minecraft, no qual o estado

do mundo (movimento de entidades, atualizações de blocos, redstone e física) é avançado em um passo fixo [13]. O servidor visa uma duração de tick de 50 ms, resultando em um TPS nominal de 20. Como o TPS é limitado a esta taxa e só pode cair quando o processamento por tick excede 50 ms, ele serve como um proxy direto, em tempo real, para a saúde computacional do lado do servidor. Uma queda sustentada abaixo de 20 TPS indica que o servidor não consegue manter o ritmo com as demandas de simulação do mundo, manifestando-se como lag de mob/física, interações de blocos atrasadas e responsividade percebida pelo jogador degradada, independentemente das condições de rede.

Conforme mostrado na CDF da Fig. 6(a), o throughput aumenta proporcionalmente com o número de usuários ativos no mundo compartilhado. Essa tendência indica que a largura de banda disponível fornecida pela infraestrutura 5G FWA é suficiente para atender às demandas de dados de múltiplos clientes imersivos, confirmando que o throughput não é o gargalo primário nesta configuração específica.

No entanto, o impacto do aumento da carga torna-se evidente ao analisar a saúde interna do motor de jogo. A Fig. 6(b) ilustra um aumento progressivo na duração do tick à medida que mais jogadores são adicionados ao ambiente. Sob a maior carga testada (3 bots mais 3 VRs), a duração máxima do tick excede o limite crítico de 50 ms. Essa degradação de desempenho reflete diretamente os níveis de latência estabelecidos na fase de caracterização do sistema. Com a RTT de rede estando na faixa de 40 ms em condições sem carga (como mostrado na Fig. 5(b)), o tempo cumulativo de processamento e transmissão para o loop do lado do servidor começa a exceder seu orçamento nominal.

Essa relação é ainda mais validada pelas CDFs de TPS na Fig. 6(c). À medida que a carga de jogadores aumenta, os valores de TPS caem consistentemente abaixo da marca ideal de 20 TPS, entrando em níveis de desempenho inferiores conforme o motor luta para sincronizar o estado do mundo entre todas as seis entidades ativas. Ao capturar com sucesso a sincronização entre KPIs de rede de baixo nível e telemetria do motor de jogo de alto nível, estes resultados validam a eficácia do framework de monitoramento em camadas (cross-layer) proposto na identificação dos fatores específicos que comprometem a QoE em ambientes imersivos 5G.

Conclusão

Este artigo apresentou uma avaliação abrangente do Minecraft, um jogo sandbox sensível à latência, implantado sobre uma infraestrutura 5G E2E privada utilizando FWA. A contribuição central deste trabalho foi a proposta e validação

de um framework de monitoramento automatizado cross-layer projetado para sincronizar KPIs de rede sem fio de baixo nível com a telemetria do motor de jogo de alto nível. Ao integrar uma 5GC privada, um gNB e um gateway FWA para fornecer conectividade para headsets Meta Quest 3, o estudo demonstrou com sucesso a viabilidade do 5G FWA como uma ponte de conectividade primária para jogos imersivos em cenários onde o suporte nativo celular atualmente não está disponível.

Os resultados experimentais proporcionaram insights críticos sobre os trade-offs de desempenho inerentes às implantações de FWA. A fase de caracterização do sistema identificou um custo de gateway composto por uma redução de 40% no throughput mediano e um aumento de 44% na RTT média (aproximadamente 12 ms) ao introduzir a ponte FWA. Embora o throughput tenha sido encontrado como suficiente para cargas de trabalho multiusuário, a análise do cenário de jogos imersivos revelou que o aumento da densidade de jogadores (até três bots e três usuários VR) impacta significativamente a saúde do lado do servidor. Especificamente, a maior carga testada empurrou a duração máxima do tick além do limite crítico de 50 ms, levando a uma degradação no TPS abaixo da taxa nominal de 20. Essas descobertas validam a eficácia do framework proposto na correlação de latências induzidas pela rede com a estabilidade do loop interno do jogo, o que é essencial

(a) Throughput.
(b) Duração do tick.
(c) Ticks por Segundo.

Fig. 6: Resultados de Validação.

para manter a imersão do jogador. Trabalhos futuros vão envolver um estudo completo sobre a análise de desempenho, incorporando todo o escorpo das métricas coletadas pelo framework de monitoramento em experimentos com maior tempo de duração. Pesquisas futuras vão explorar diversas configurações de hardware e software para implementação do gNB, comparando especificamente a USRP B210 e N310 com diferentes protocolos open stacks (OCUDU and DURANTA). Além disso, a análise objetiva de QoS apresentada neste trabalho será complementada por avaliações subjetivas de QoE envolvendo jogadores humanos reais para avaliar o impacto percebido de flutuações da rede na jogabilidade e na imersão.

Referências

[1] G. V. Research, “Extended Reality Market (2024 - 2030),” 2024. [Online]. Available: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/extended-reality-xr-market-report

[2] F. Business, “Extended Reality Market Size, Share & Industry Analysis

and Regional Forecast, 2026–2034," 2026. [Online]. Available: https://www.fortunebusinessinsights.com/extended-reality-market-106637
[3] A. Clérigo, G. Silva, M. Schrapel, P. Rito, S. Sargento, and A. Vinel, "Cooperative Augmented Reality: Displaying Occluded Vehicles using V2X Communications," in IEEE VNC, 2025.
[4] K. Kieanwatana and R. Vongvit, "Virtual reality in tourism: The impact of virtual experiences and destination image on the travel intention," Results in Engineering, vol. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024018930
[5] R. Kim, "Retail After COVID-19: Use Virtual Reality to Enhance Ecommerce," in 2022 IEEE Technology and Engineering Management Conference (TEMSCON EUROPE), 2022, pp. 118–123.
[6] S. Machała, N. Chamier-Gliszczy´nski, and T. Królikowski, "Application of AR/VR Technology in Industry 4.0." Procedia Computer Science, vol. 207, pp. 2990–2998, 2022.
[7] E. Stafidas and F. Foukalas, "A Survey on Enabling XR Services in Beyond 5G Mobile Networks," IEEE Access, vol. 12, pp. 59 170–59 197, 2024.
[8] M. Susloparov, A. Krasilov, and E. Khorov, "Providing High Capacity for AR/VR traffic in 5G Systems with Multi-Connectivity," in IEEE BlackSeaCom, 2022.
[9] O. S. Peñaherrera-Pulla, C. Baena, S. Fortes, E. Baena, and R. Barco, "KQI Assessment of VR Services: A Case Study on 360-Video Over 4G and 5G," IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 19, no. 4, pp. 5366–5382, 2022.
[10] T. Taleb, N. Sehad, Z. Nadir, and J. Song, "VR-Based Immersive Service Management in B5G Mobile Systems: A UAV Command and Control Use Case," IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 6, pp. 5349–5363, March 2023.
[11] F. Hu, Y. Deng, H. Zhou, T. H. Jung, C.-B. Chae, and A. H. Aghvami, "A Vision of an XR-Aided Teleoperation System toward 5G/B5G," IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 1, pp. 34–40, 2021.
[12] J. K. Sundararajan, H.-J. Kwon, O. Awoniyi-Oteri, Y. Kim, C.-P. Li, J. Damnjanovic, S. Zhou, R. Ma, Y. Tokgoz, P. Hande, T. Luo, K. Mukkavilli, and T. Ji, "Performance Evaluation of Extended Reality Applications in 5G NR System," in 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2021, pp. 1–7.
[13] Minecraft Wiki, "Tick," https://minecraft.wiki/w/Tick, 2026, accessed: 2026-08-17.

Anexos



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3



Fig. 4 (a)



Fig. 4 (b)



Fig. 4 (c)



Fig. 5 (a)



Fig. 5 (b)



Fig. 6 (a)



Fig. 6 (b)



Fig 6 (c)



Tabela I



Tabela II



Tabela III

CÓDIGO: ET1658

AUTOR: ALAN VICTOR SANTOS DE SOUZA

ORIENTADOR: SANDRA RUFINO SANTOS

TÍTULO: Observatório de Tecnologia Social no Seridó Potiguar: diagnóstico territorial e coprodução do conhecimento no Projeto SEMEAR

Resumo

Este relato sintetiza a experiência de iniciação científica no Projeto SEMEAR (Segurança alimentar, Educação popular, Monitoramento participativo, Extensão universitária, Agroecologia e participação social), aprovado na Chamada CNPq/FNDCT/SGPR/MDS nº 17/2025 e executado no Seridó potiguar em coordenação adjunta entre a Universidade Federal do Rio Grande do Norte, por meio da Incubadora de Tecnologias Sociais Engenheiros Sem Fronteiras, e organizações da sociedade civil parceiras. A atuação como bolsista permitiu acompanhar o diagnóstico territorial do Seridó, marcado por forte presença da agricultura familiar, baixa cobertura de assistência técnica e fragilidades na execução de mercados institucionais como o PNAE e o PAA, além dos primeiros ciclos de planejamento coletivo, composição descentralizada da equipe e construção conjunta de instrumentos de diagnóstico participativo e sistematização de experiências, etapas voltadas à estruturação de um Observatório de Tecnologia Social. A vivência evidenciou que a coprodução do conhecimento entre universidade e organizações comunitárias amplia a legitimidade territorial das ações, ao mesmo tempo em que expõe tensões entre prazos institucionais e tempos da mobilização social. Conclui-se que fortalecer a participação popular e a segurança alimentar no Seridó depende da consolidação de instâncias de controle social e de uma tecnologia social capaz de converter vulnerabilidades locais em subsídios para políticas públicas territoriais.

Palavras-chave: Tecnologia Social. Segurança Alimentar. Participação Social. Seridó.

TITLE: Social Technology Observatory in the Potiguar Seridó: territorial diagnosis and knowledge co-production in the SEMEAR Project

Abstract

This report synthesizes an undergraduate research experience within the SEMEAR Project (Food Security, Popular Education, Participatory Monitoring, University Extension, Agroecology and Social Participation), approved under Call CNPq/FNDCT/SGPR/MDS No. 17/2025 and carried out in the Seridó Territory, Rio

Grande do Norte, through joint coordination between the Federal University of Rio Grande do Norte, via Social Technologies Engineers Without Borders, and partner civil society organizations. Acting as an undergraduate researcher allowed for following the territorial diagnosis of Seridó, marked by a strong presence of family farming, low technical assistance coverage and weaknesses in institutional food markets such as PNAE and PAA, as well as the initial cycles of collective planning, decentralized team composition and joint construction of participatory diagnostic and systematization instruments, steps oriented toward structuring a Social Technology Observatory. The experience showed that knowledge co-production between the university and community organizations broadens the territorial legitimacy of actions, while exposing tensions between institutional funding timelines and the pace of social mobilization. It is concluded that strengthening popular participation and food security in Seridó depends on consolidating social control bodies and on a social technology able to convert identified vulnerabilities into effective input for territorial public policy.

Keywords: Social Technology. Food Security. Social Participation. Seridó.

Introdução

A alimentação é um direito social previsto no art. 6º da Constituição Federal (Brasil, 1988), aprofundado pela Lei nº 11.346/2006, que instituiu o Sistema Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional (SISAN) com vistas a assegurar o Direito Humano à Alimentação Adequada. No semiárido brasileiro, contudo, a efetivação desse direito é atravessada por condicionantes climáticas, sociais e institucionais próprias: a irregularidade hídrica e a desigualdade histórica no acesso a recursos tornam a Segurança Alimentar e Nutricional (SAN) uma questão que ultrapassa a disponibilidade de alimentos, envolvendo também renda, saneamento, informação e assistência técnica (Alpino, 2020; Leal; Alencar; Montano, 2021).

Nesse cenário, a agricultura familiar cumpre papel estruturante como base produtiva de muitos territórios semiáridos, sustentando práticas de autoconsumo, circuitos curtos de comercialização e formas de permanência no campo (Wanderley, 1999; Silva et al., 2020). A inserção dessa agricultura em canais de comercialização estáveis encontrou, historicamente, nos mercados institucionais uma via de regulação estatal da demanda: o Programa de Aquisição de Alimentos (PAA) e o Programa Nacional de Alimentação Escolar (PNAE) consolidaram-se como principais eixos de compra pública de gêneros alimentícios da agricultura familiar (Grisa; Schneider, 2014; Brasil, 2009). A efetividade desses mercados, todavia, depende da vitalidade de instâncias de participação e controle social, como os Conselhos de Alimentação Escolar (CAE) e os Conselhos de Segurança Alimentar e Nutricional (CONSEA), cuja atuação exige formação, autonomia e condições materiais de funcionamento (Gabriel et al., 2013).

É nesse campo de mediações entre política pública, agricultura familiar e participação social que se situa a Tecnologia Social (TS), compreendida como processo sociotécnico voltado à democratização das decisões sobre a tecnologia, à identificação comunitária de problemas e à construção coletiva de soluções e de saber (Bagattolli et al., 2026). Diferentemente da extensão tecnicista que transfere soluções prontas, a TS desloca a comunidade da posição de destinatária para a de sujeito que interpreta necessidades e acompanha os rumos processuais.

O Território do Seridó potiguar, no interior do Rio Grande do Norte, reúne condições particularmente relevantes para observar essa articulação: forte presença histórica da agricultura familiar, formação sertaneja marcada pela caatinga e pela convivência com a seca, e integração ao Programa Territórios da Cidadania (Corrêa, 2009). É nesse território que se desenvolve o Projeto Semear no Seridó: Observatório de Tecnologia Social para Participação Popular e Segurança Alimentar, aprovado na Chamada CNPq/FNDCT/SGPR/MDS nº 17/2025, Extensão e Pesquisa em Participação Social nos Territórios (Território 51). O projeto reúne, em coordenação adjunta, a Universidade Federal do Rio Grande do Norte, por meio das Tecnologias Sociais Engenheiros Sem Fronteiras (ESF/UFRN), e duas organizações da sociedade civil com longa trajetória territorial: o Serviço de Apoio a Projetos Alternativos e Comunitários (SEAPAC) e a Federação de Cooperativas da Agricultura Familiar e Economia Solidária do Rio Grande do Norte (UNICAFES/RN).

Este relato de iniciação científica sistematiza a experiência de participação nos primeiros meses do Semear, articulando duas frentes complementares: o diagnóstico territorial do Seridó quanto à agricultura familiar, à assistência técnica e à execução de mercados institucionais; e o próprio processo de coprodução do conhecimento entre universidade e organizações parceiras, tomado como objeto de reflexão metodológica. Buscou-se compreender em que medida um Observatório de Tecnologia Social pode qualificar a incidência social sobre as políticas de segurança alimentar no território, refletindo também sobre os desafios de uma extensão que compartilha, em vez de transferir, a produção do conhecimento.

Metodologia

A experiência aqui relatada decorre da participação, na condição de bolsista de iniciação científica, no Projeto Semear no Seridó, em execução desde fevereiro de 2026. O relato adota abordagem descritiva e reflexiva, orientada à compreensão de um processo em andamento e não à generalização estatística, ainda que produza subsídios metodológicos potencialmente transferíveis a experiências similares em outros territórios semiáridos.

O delineamento metodológico do Semear articula duas frentes complementares, acompanhadas ao longo da iniciação científica. A primeira é de natureza documental e descritiva, baseada na análise de bases públicas e registros institucionais: dados territoriais e agropecuários do IBGE, especialmente o Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2017; Tabelas SIDRA 6780 e 6846); dados públicos do FNDE sobre compras da agricultura familiar no PNAE no período de 2011 a 2022 (FNDE, 2024); informações sobre a execução do PAA e sobre a adesão municipal ao SISAN (Brasil, 2023; Brasil, 2026); e o próprio documento do Projeto Semear, analisado quanto a objetivos, público e repertório teórico. O tratamento desses dados, sobretudo a série histórica do PNAE, foi realizado por meio de linguagem Python em ambiente Google Colab, viabilizando a leitura agregada e municipal das dinâmicas do Seridó.

A segunda frente, de natureza qualitativa, orienta-se pelos fundamentos da pesquisa ação participativa (Thiollent, 2011) e da sistematização de experiências (Holliday, 2006), em diálogo com a Educação Popular freireana (FREIRE, 1971). A pesquisa ação

organiza a execução do Semear em ciclos sucessivos de planejamento coletivo, ação, observação e reflexão crítica, nos quais pesquisadores da universidade e representantes das organizações parceiras atuam simultaneamente como sujeitos e produtores do conhecimento. Já a sistematização de experiências, seguindo os cinco momentos propostos por Holliday (2006), ponto de partida, perguntas iniciais, recuperação do processo vivido, reflexão de fundo e pontos de chegada, incide sobre o próprio processo de coconstrução entre universidade e organizações da sociedade civil, tomado como objeto central de reflexão deste relato.

O projeto reúne, em coordenação adjunta, três organizações coexecutoras: a Universidade Federal do Rio Grande do Norte, por meio das Tecnologias Sociais Engenheiros Sem Fronteiras (ESF/UFRN); o Serviço de Apoio a Projetos Alternativos e Comunitários (SEAPAC), vinculado à rede Associação do Semiárido, com décadas de acúmulo junto às comunidades rurais; e a Federação de Cooperativas da Agricultura Familiar e Economia Solidária do Rio Grande do Norte (UNICAFES/RN). A atuação está prevista em cinco municípios prioritários do Território do Seridó, Jucurutu, Cruzeta, Currais Novos, Parelhas e Caicó, definidos coletivamente pelas organizações com base em diagnósticos territoriais prévios e na capilaridade institucional de cada parceiro.

Os primeiros meses de execução, acompanhados diretamente na condição de bolsista, seguiram etapas sucessivas: o primeiro mês foi dedicado ao planejamento participativo interinstitucional, resultando em seis reuniões de planejamento e acompanhamento e na consolidação do plano de ação junto à coordenação nacional e estadual do Programa de Alimentação Saudável (PAS) Nordeste; o segundo mês voltou-se à composição descentralizada da equipe, com doze integrantes bolsistas, entre graduação, nível médio técnico, apoio ao desenvolvimento, desenvolvimento tecnológico e coordenação, distribuídos entre Natal, Santa Cruz e Caicó, vinculados tanto à UFRN quanto às OSCs parceiras; o terceiro e o quarto meses foram dedicados à socialização e ao ajuste dos instrumentos já existentes em cada organização e à construção coletiva de dois instrumentos metodológicos: roteiros de diagnóstico rural participativo e fichas de sistematização de tecnologias sociais.

As fontes de dados mobilizadas neste relato articulam revisão de literatura sobre segurança alimentar, tecnologia social e extensão popular; o plano de ação elaborado coletivamente no início da execução; os registros das reuniões interinstitucionais mensais realizadas entre fevereiro e o momento da elaboração deste texto; e as bases públicas do IBGE e do FNDE já mencionadas. A participação como bolsista de iniciação científica concentrou-se em duas frentes: o acompanhamento das reuniões interinstitucionais de planejamento e a coleta e o tratamento dos dados territoriais e das séries históricas de execução do PNAE, cuja leitura constitui a matéria-prima empírica sobre a qual se apoiam os resultados e a reflexão apresentados na seção seguinte.

Resultados e Discussões

3.1 O Seridó como base produtiva: agricultura familiar, associativismo e assistência técnica

O acompanhamento do diagnóstico territorial permitiu dimensionar o Seridó a partir do Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2017). O Território da Cidadania do Seridó, que reúne 25 municípios do Rio Grande do Norte, concentra 10.974 estabelecimentos agropecuários, dos quais 8.861 (80,7%) são classificados como agricultura familiar e 2.113 (19,3%) como agricultura não familiar. A predominância numérica da agricultura familiar já indicava, antes mesmo da chegada ao campo, o público prioritário das ações do Semear.

Um segundo indicador acompanhado foi o vínculo associativo dos produtores, relevante para compreender a capacidade organizativa da base agropecuária. Do total de estabelecimentos, 6.595 (60,1%) possuem produtores associados a alguma cooperativa, entidade de classe, sindicato, associação ou movimento; entre os da agricultura familiar, esse percentual sobe para 63,0%. A composição desses vínculos, no entanto, revela predomínio de formas organizativas ligadas à representação sindical e de classe, em detrimento da cooperação econômica formal: enquanto 5.357 registros associam-se a entidades de classe ou sindicatos, apenas 226 vinculam-se a cooperativas propriamente ditas. Essa distribuição sugere uma base associativa expressiva, porém pouco ancorada em cooperativas, forma organizativa frequentemente exigida para ampliar escala e regularidade de acesso a mercados.

O indicador que mais chamou atenção durante o levantamento foi o de assistência técnica: apenas 2.022 dos 10.974 estabelecimentos do Seridó (18,4%) declararam receber algum tipo de orientação técnica; entre os estabelecimentos da agricultura familiar, a cobertura cai para 15,9%, contra 29,0% na agricultura não familiar. Além da baixa cobertura, observou-se que a orientação recebida pelos agricultores familiares provém majoritariamente de órgãos governamentais, o que expõe maior dependência das estruturas públicas de Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER), enquanto estabelecimentos não familiares recorrem com mais frequência a assistência privada ou própria. Esse achado orientou diretamente uma das linhas de ação do Semear, já que a inserção em mercados institucionais como o PAA e o PNAE depende de planejamento produtivo, regularidade de oferta e adequação documental, condições que a baixa cobertura de ATER dificulta. A leitura desses três indicadores, feita em conjunto, situou o ponto de partida da iniciação científica: um território com forte vocação para a agricultura familiar, mas com fragilidades organizativas e técnicas que ajudam a explicar, adiante, o desempenho observado nos mercados institucionais.

3.2 A execução do PNAE e do PAA no Seridó

A segunda etapa do diagnóstico envolveu o acompanhamento da série histórica de compras da agricultura familiar pelo PNAE no Seridó, entre 2011 e 2022, reunida a partir dos dados públicos do FNDE (FNDE, 2024). O percentual mínimo de 30% dos recursos do FNDE destinados à compra direta da agricultura familiar, estabelecido pela Lei nº 11.947/2009, permaneceu descumprido pelo território em praticamente toda a série: partindo de 8,5% em 2011, o percentual agregado aproximou-se de 13% em 2013 e 2014, recuou para 7,5% em 2017, subiu para 20,8% em 2019 e caiu novamente para 5,3% em 2020, justamente no período pandêmico em que o PNAE assumiu relevância adicional para a segurança alimentar das famílias. Somente em 2022 o território superou o mínimo histórico, alcançando 31,2%, resultado que precisa ser lido com cautela diante da irregularidade acumulada e da elevação do percentual mínimo para 45% a partir de 2026.

A leitura agregada, contudo, esconde desigualdades municipais relevantes. Em 2022, municípios como Caicó (51%), Parelhas (49%) e Currais Novos (45%) superaram o mínimo legal, mas essa performance correspondeu a apenas 20% dos municípios do Seridó, enquanto outros permaneceram abaixo do limite ou sequer registraram dados, caso de Jucurutu (Brasil, 2022). Essa dispersão indica que o cumprimento da política depende menos da presença da agricultura familiar, que é significativa em todo o território, e mais da capacidade institucional de cada município em planejar chamadas públicas, articular produtores e acompanhar a execução.

Quanto ao PAA, o acompanhamento revelou um obstáculo estrutural adicional: nenhum dos 25 municípios do Território da Cidadania do Seridó consta na listagem oficial de municípios aderidos ao SISAN, condição exigida pelo Decreto nº 11.802/2023 (Brasil, 2023) para a execução do PAA por termo de adesão, especialmente na modalidade Compra com Doação Simultânea. Essa ausência de adesão restringe uma via importante de operacionalização direta do programa no território, mesmo diante da base expressiva de agricultura familiar identificada na etapa anterior. A região aparece historicamente vinculada ao PAA Leite, modalidade executada por convênio com estados do Nordeste, mas o acompanhamento de estudos anteriores sobre mercados institucionais no Seridó (Silva, 2018) já apontava limitações relacionadas a arranjos institucionais, dispersão geográfica dos produtores e critérios de entrada nos programas, achados que dialogam diretamente com o quadro identificado nesta etapa da iniciação científica.

3.3 Instâncias de participação e controle social

O terceiro eixo do diagnóstico voltou-se às instâncias formais de participação e controle social vinculadas à segurança alimentar. Os Conselhos de Alimentação Escolar (CAE) têm existência formal confirmada nos municípios do Seridó, sobretudo por meio de nomeações, formações e atos ligados à prestação de contas, mas essa materialidade institucional mostrou-se mais visível no controle fiscal e documental do que na incidência continuada sobre os gargalos processuais do PNAE, cardápios, editais, fornecedores e percentuais de aquisição. No caso do SISAN, apenas oito municípios do Rio Grande do Norte constam como aderidos ao sistema (BRASIL, 2026), e nenhum deles integra o Seridó, o que também limita a existência de Conselhos Municipais de Segurança Alimentar e Nutricional (CONSEA) ativos no território.

Esse quadro de baixa institucionalização participativa foi um dos elementos que orientaram, já nas primeiras reuniões interinstitucionais do Semear, uma decisão relevante: em vez de investir esforços na tentativa de reativar instâncias formalmente existentes mas paralisadas, as organizações coexecutoras optaram por priorizar o fortalecimento de conselhos e espaços que já apresentavam algum grau de funcionamento, renegociando prazos e metas do plano de ação original. Acompanhar essa decisão de perto, enquanto bolsista, evidenciou como o diagnóstico territorial não é apenas insumo para a escrita de um relatório, mas orienta escolhas concretas sobre onde e como investir energia política e institucional limitada.

3.4 O Observatório de Tecnologia Social como resposta territorial

Diante das fragilidades identificadas, baixa cobertura de assistência técnica, execução instável do PNAE, ausência de adesão ao SISAN e instâncias participativas pouco atuantes, o Projeto Semear propõe a criação de um Observatório de Tecnologia Social

para Participação Popular e Segurança Alimentar. O observatório busca mapear as experiências de convivência com a seca mediadas por tecnologias sociais já existentes no território, como cisternas de placas, barragens subterrâneas, biodigestores, entre outras, utilizando o Diagnóstico Rural Participativo (DRP) como ferramenta metodológica de campo. Paralelamente, prevê a formação de multiplicadores comunitários, com foco na população jovem, como estratégia de enfrentamento ao êxodo rural, e a capacitação em participação social voltada à reativação ou ao fortalecimento de instâncias como comitês gestores do PAA e CONSEAs.

O acervo de práticas mapeadas em campo e o monitoramento das instâncias participativas devem convergir para uma plataforma digital georreferenciada e colaborativa, de cadastro aberto, permitindo que as próprias comunidades insiram suas experiências. A lógica de funcionamento do observatório pode ser ilustrada por um exemplo trabalhado internamente pela equipe: uma propriedade que possui um biodigestor eficiente no tratamento de resíduos e na produção de biofertilizante pode, ainda assim, enfrentar dificuldade em gerar excedentes comercializáveis via PAA ou PNAE por falta de sementes adequadas às práticas locais. Se a plataforma indicar que essa restrição se repete em outras propriedades da região, a construção de uma Casa de Sementes Comunitária desponta como resposta territorial de maior impacto do que uma solução pontual, oferecendo ao gestor público um suporte empírico para orientar recursos e planejamento, inclusive em instrumentos como os Planos Plurianuais (PPAs).

3.5 A coprodução do conhecimento entre universidade e organizações da sociedade civil

Além do diagnóstico territorial, a experiência de iniciação científica permitiu observar, a partir de dentro, o próprio arranjo de governança do Semear, o que constitui a segunda frente deste relato. Diferentemente do modelo convencional de extensão universitária, no qual a universidade concentra a concepção do projeto e a definição de prioridades, o Semear estrutura-se como coordenação adjunta autogestionária entre ESF/UFRN, SEAPAC e UNICAFES/RN, caracterizada por decisões estratégicas tomadas coletivamente desde a concepção, legitimidade territorial reconhecida às OSCs parceiras e propriedade compartilhada dos produtos gerados, incluindo o próprio Observatório.

Acompanhar as seis primeiras reuniões interinstitucionais permitiu perceber, na prática, como esse modelo se distingue de uma simples parceria operacional: as organizações parceiras não apenas executam ações no território, mas participam da definição de prioridades e do ajuste de instrumentos metodológicos. Um exemplo concreto observado foi a reformulação do roteiro de diagnóstico participativo inicialmente proposto pela ESF/UFRN, que teve sua complexidade questionada e foi ajustado a partir da base de dados já existente no SEAPAC, um banco que acompanha cerca de cinquenta famílias no Seridó com monitoramento da transição agroecológica. Esse episódio ilustra o que a literatura mobilizada pelo projeto descreve como uma ecologia de saberes (SANTOS, 2007): não se trata de a ciência acadêmica validar o saber popular, tampouco o contrário, mas de um encontro que produz um instrumento mais adequado à realidade do território.

A composição descentralizada da equipe, com bolsistas vinculados tanto à UFRN quanto às OSCs, distribuídos entre Natal e os municípios do interior, também trouxe um efeito formativo direto para quem participa como bolsista de iniciação científica: a experiência de transitar entre a lógica acadêmica e a lógica das organizações territoriais,

aprendendo a mediar diferenças de linguagem, ritmo e prioridades. Essa vivência aproxima-se do que Melo Neto (2004) descreve como a formação do extensionista popular a partir do trânsito entre epistemologias distintas.

3.6 Tensões entre tempos institucionais e tempos da mobilização social

A reflexão sobre os primeiros meses de execução não seria completa sem reconhecer as tensões enfrentadas. A principal delas diz respeito ao descompasso entre os prazos rígidos de editais de fomento e o tempo necessário à mobilização social, à construção de confiança comunitária e à validação coletiva de instrumentos metodológicos. Essa tensão exigiu, na prática, negociações constantes entre as organizações coexecutoras, renegociação de metas e priorização de ações com maior viabilidade de curto prazo, sem abrir mão do compromisso com a construção coletiva. Do ponto de vista da formação enquanto bolsista, essa etapa foi especialmente relevante para compreender que a pesquisa aplicada em territórios não se desenvolve de forma linear, mas por meio de ciclos de ação e reflexão que exigem flexibilidade institucional, um aprendizado que dificilmente seria alcançado apenas pela leitura de referenciais teóricos sobre extensão popular e tecnologia social.

Por fim, cabe destacar que a articulação interinstitucional do Semear já produziu efeitos de incidência política que extrapolam o próprio projeto, como a participação em reuniões do Programa de Alimentação Saudável (PAS) Nordeste e o diálogo com instâncias federais sobre metodologias de mapeamento participativo. Esses efeitos reforçam a compreensão, construída ao longo da iniciação científica, de que o Observatório de Tecnologia Social não é apenas um produto acadêmico, mas um dispositivo permanente de articulação entre sociedade civil, universidade e gestão pública, cuja consolidação depende da continuidade do processo participativo que vem sendo construído desde os primeiros meses de execução do projeto.

Conclusão

A experiência de iniciação científica no Projeto Semear no Seridó permitiu compreender, de forma integrada, dois planos que costumam ser tratados separadamente: o diagnóstico técnico de um território semiárido e o processo político-pedagógico de construção coletiva do conhecimento entre universidade e organizações da sociedade civil. O levantamento territorial evidenciou um Seridó com forte presença da agricultura familiar e base associativa expressiva, mas marcado por baixa cobertura de assistência técnica, execução instável do PNAE e ausência de adesão municipal ao SISAN, fatores que ajudam a explicar a dificuldade histórica de conversão dessa base produtiva em compra pública efetiva.

Diante desse quadro, o Observatório de Tecnologia Social proposto pelo Semear desponta como estratégia capaz de transformar vulnerabilidades dispersas em evidências organizadas, subsidiando decisões públicas e fortalecendo instâncias de

participação hoje pouco atuantes no território. A observação direta dos primeiros meses de execução mostrou, contudo, que essa construção não é apenas técnica, mas depende de uma governança compartilhada entre ESF/UFRN, SEAPAC e UNICAFES/RN, capaz de redistribuir poder decisório e reconhecer o acúmulo territorial das organizações parceiras como saber legítimo, e não apenas como ponto de acesso ao campo.

Do ponto de vista formativo, a participação nesta etapa inicial evidenciou que a pesquisa aplicada em territórios semiáridos exige lidar com tensões reais entre prazos institucionais e tempos de mobilização social, e que essas tensões, embora desafiadoras, constituem também matéria-prima de aprendizado sobre coprodução de conhecimento, sistematização de experiências e extensão popular. Reconhece-se que o projeto encontra-se em fase inicial e que parte relevante dos resultados aqui discutidos ainda depende das etapas de campo previstas para os próximos meses.

Recomenda-se que estudos futuros, a partir da consolidação do Observatório, avaliem com maior profundidade o impacto das ações de formação e monitoramento participativo sobre a efetivação do PNAE e do PAA no Seridó, bem como o processo de adesão dos municípios ao SISAN, indicador que se mostrou central para compreender os limites institucionais atuais do território.

Referências

ALPINO, Tais de Moura Ariza. Segurança Alimentar e Nutricional (SAN), seca e reprodução social: a realidade do semiárido brasileiro. 2020. 175 f. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2020.

BAGATTOLLI, Carolina et al. Tecnologia social: princípios, elementos e definição. Associação Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão em Tecnologia Social - ABEPETS. Zenodo, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.5281/zenodo.18790708. Acesso em: 25 fev. 2026.

BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidente da República, 1988.

BRASIL. Lei nº 11.346, de 15 de setembro de 2006. Cria o Sistema Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional - SISAN. Brasília, DF: Presidência da República, 2006.

BRASIL. Lei nº 11.947, de 16 de junho de 2009. Dispõe sobre o atendimento da alimentação escolar e do Programa Dinheiro Direto na Escola aos alunos da educação básica. Brasília, DF: Presidência da República, 2009.

BRASIL. Decreto nº 11.802, de 28 de novembro de 2023. Regulamenta o Programa de Aquisição de Alimentos. Brasília, DF: Presidência da República, 2023.

BRASIL. Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. Aquisições da agricultura familiar no PNAE: dados por município, 2022. Brasília, DF: FNDE, 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento e Assistência Social, Família e Combate à Fome. Municípios aderidos ao SISAN. Brasília, DF: MDS, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/mds/pt-br/caisan/sisan/listaatualizada_2153.pdf. Acesso em: 25 maio 2026.

CORRÊA, Vanessa Petrelli. Desenvolvimento territorial e a implantação do Programa Territórios da Cidadania. Boletim Regional, Urbano e Ambiental, Brasília, DF, n. 3, p. 23-36, dez. 2009.

FNDE. Dados da agricultura familiar. Brasília, DF: FNDE, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/fnde/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/pnae/consultas/pnae-dados-da-agricultura-familiar. Acesso em: 1 jun. 2026.

FREIRE, Paulo. Extensão ou comunicação? Tradução de Rosisca Darcy de Oliveira. 8 ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1971.

GABRIEL, Cristine Garcia et al. Conselhos Municipais de Alimentação Escolar em Santa Catarina: caracterização e perfil de atuação. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, p. 971-978, 2013.

GRISA, Cátia; SCHNEIDER, Sergio. Três gerações de políticas públicas para a agricultura familiar e formas de interação entre sociedade e estado no Brasil. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 52, supl. 1, p. 125-146, 2014.

HOLLIDAY, Oscar Jara. Para sistematizar experiências. Tradução de Maria Viviana V. Resende. 2 ed. Brasília: MMA, 2006.

IBGE. Censo Agropecuário 2017: Resultados Definitivos. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017/resultados-definitivos. Acesso em: 24 maio 2026.

LEAL, Thomas Leonardo Marques Castro; ALENCAR, Nívia Raquel Oliveira; MONTANO, Romari Alejandra Martinez. Segurança alimentar e o semiárido brasileiro: uma revisão sistemática. Saúde e Meio Ambiente: Revista Interdisciplinar, [S. l.], v. 10, p. 78-90, 2021.

MELO NETO, José Francisco de. Extensão universitária, autogestão e educação popular. João Pessoa: Editora da Universidade Federal da Paraíba, 2004. 210 p.

SANTOS, Boaventura de Sousa. Para além do pensamento abissal: das linhas globais a uma ecologia de saberes. Revista Crítica de Ciências Sociais, n. 78, p. 3-46, out. 2007.

SILVA, Roberto Marinho Alves da; AQUINO, Joacir Rufino de; COSTA, Fernando Bastos; NUNES, Emanoel Márcio. Características produtivas e socioambientais da agricultura familiar no Semiárido brasileiro: evidências a partir do Censo Agropecuário de 2017. Desenvolvimento e Meio Ambiente, [S. l.], v. 55, 2020.

SILVA, Vinícius Klause da. Mercados institucionais no território do Seridó potiguar: potencialidades e limitações para inserção da agricultura familiar. 2018. 151 f. Dissertação (Mestrado em Estudos Urbanos e Regionais) - Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

THIOLLENT, Michel. Metodologia da pesquisa-ação. 18 ed. São Paulo: Cortez, 2011.

WANDERLEY, Maria de Nazareth Baudel. Raízes históricas do campesinato brasileiro. In: TEDESCO, João Carlos (org.). Agricultura familiar: realidades e perspectivas. Passo Fundo: EDIUPF, 1999.

CÓDIGO: ET1661

AUTOR: DAMARA EMILY VILAR DE ARAUJO

ORIENTADOR: ANA PAULA CYSNE BARBOSA

TÍTULO: Estudo de um compósito híbrido epóxi-cimento para aplicações em subsuperfície

Resumo

Em aplicações industriais que envolvem condições severas de temperatura, pressão e ambientes corrosivos, há grande demanda por materiais que apresentem alta resistência mecânica e química. Nesse contexto, a combinação de propriedades como flexibilidade, baixa permeabilidade e boa adesão da resina epóxi com as de alta resistência à compressão, estabilidade térmica e resistência química do cimento Portland possibilita o desenvolvimento de um material alternativo com potencial para aplicações de alto desempenho mecânico em condições de subsuperfície. Assim, este trabalho tem como objetivo caracterizar um compósito híbrido com matriz cimentícia modificada pela incorporação de resina epóxi, avaliando como diferentes proporções volumétricas das fases influenciam as propriedades do material. A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia eletrônica de varredura, com foco na morfologia e na interface das fases, enquanto que o comportamento reológico e mecânico foi investigado através de ensaios reológicos e de resistência à compressão. Os resultados permitiram avaliar as relações entre composição, microestrutura e propriedades resultantes da incorporação da resina, sugerindo que o aumento da resistência ao escoamento das pastas e redução da resistência à compressão, podem estar associados à interface cimento-epóxi.

Palavras-chave: resina epóxi, cimento Portland, compósito, reologia, compressão.

TITLE: Study of a Hybrid Epoxy–Cement Composite for Subsurface Applications

Abstract

In industrial applications involving severe temperature and pressure conditions and corrosive environments, there is a high demand for materials with high mechanical and chemical resistance. In this context, combining properties such as the flexibility, low permeability, and good adhesion of epoxy resin with the high compressive strength, thermal stability, and chemical resistance of Portland cement enables the development of an alternative material with potential for high-performance mechanical applications

under subsurface conditions. Therefore, this study aims to characterize a hybrid composite consisting of a cementitious matrix modified by the incorporation of epoxy resin, evaluating how different volumetric proportions of the phases influence the material properties. Microstructural characterization was performed by scanning electron microscopy, focusing on the morphology and interface between the phases, while the rheological and mechanical behavior was investigated through rheological and compressive strength tests. The results allowed the relationships between composition, microstructure, and the properties resulting from resin incorporation to be evaluated, suggesting that the increased resistance to flow of the cement pastes and the reduction in compressive strength may be associated with the cement–epoxy interface.

Keywords: epoxy resin, Portland cement, composite, rheology, compressive.

Introdução

A indústria petrolífera constitui um dos maiores setores industriais do mundo, envolvendo a participação de grandes companhias e instituições, que apoiam a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias. Nesse contexto, a busca por novos materiais aplicáveis às diferentes etapas da exploração e produção de petróleo e gás apresenta grande relevância [1]. Dentre os materiais mais empregados nesta indústria, encontra-se o cimento Portland, classificado como um material cerâmico, constituído principalmente por calcário, sílica, alumina e óxido de ferro [2]. No processo de cimentação de poços de petróleo, a sua principal função é promover o isolamento dos fluidos de formação, além de fornecer suporte e proteção para o revestimento [3]. Entretanto, apesar de sua excelente resistência, a matriz cimentícia apresenta um comportamento frágil, que pode ser intensificado quando esta é submetida às condições de temperatura, pressão e esforços decorrentes dos processos de exploração do petróleo e gás, podendo ocasionar sua ruptura [3-6]. Dessa forma, a incorporação de materiais poliméricos à matriz cimentícia apresenta-se como um meio de compensar algumas de suas características, como a elevada fragilidade, baixa resistência à deformação e à corrosão e a baixa resistência de ligação [4,7,8].

Nesse sentido, a resina epóxi, que possui cadeias poliméricas flexíveis, pode atuar como agente de tenacificação na matriz de cimento. Além disso, devido à elevada estabilidade química e resistência térmica e à corrosão, pode contribuir para a proteção da matriz de cimento quando esta é submetida a meios ácidos e corrosivos [9,10]. Por se tratar de um polímero termofixo, durante seu processo de cura, a resina epóxi forma ligações covalentes intermoleculares, formando uma rede tridimensional. Quando incorporada à matriz de cimento, ela pode interagir com os produtos de hidratação do cimento e formar filmes poliméricos, que contribuem para alterações da microestrutura e das propriedades mecânicas do material [3,5]. No entanto, um dos principais desafios está justamente em incorporá-la à matriz cimentícia, uma vez que diferenças de compatibilidade entre os constituintes podem comprometer a interação entre as fases e, consequentemente, o desempenho mecânico do sistema.

Embora diversos estudos sobre sistema cimento-epóxi empreguem resinas compatíveis com o meio aquoso [3-5,11], a utilização de resina epóxi não aquosa introduz desafios

relacionados à dispersão e à interação entre as fases, tornando este um tema relevante para investigação, para compreender seu comportamento quando incorporada à matriz cimentícia. Diante disso, este trabalho tem como objetivo estudar os efeitos da incorporação em diferentes porcentagens de resina epóxi em uma matriz cimentícia destinada à cimentação de poços de petróleo. Assim, será avaliado como as propriedades reológicas e a resistência à compressão do sistema são afetadas, assim como a morfologia dos materiais obtidos.

Metodologia

Foram preparadas quatro formulações de pastas cimentícias, sendo uma formulação de referência, sem adição de resina, e três formulações contendo diferentes porcentagens de resina epóxi: 0%, 5%, 10% e 20%. As formulações foram denominadas, respectivamente, REF, C95-R5, C90-R10 e C80-R20. Para a preparação das pastas, foi utilizado cimento Portland Classe G, água doce e os seguintes aditivos: antiespumante, dispersante e controlador de filtrado. Como fase polimérica, foi utilizada uma resina epóxi de baixa viscosidade, juntamente com o seu endurecedor.

A pasta cimentícia de referência foi formulada com fator água/cimento de 43,78% e massa específica de 15,8 lb/gal, sendo preparada para um volume de 600 mL. As demais composições foram preparadas com base na substituição do volume da pasta de cimento de acordo com a porcentagem de resina (já incorporada com o endurecedor) correspondente. As pastas foram preparadas em copo misturador, utilizando-se inicialmente uma rotação de 4.000 rpm durante 15 s, seguida de uma rotação de 12.000 rpm durante 35 s. Em seguida, foram pesadas as massas correspondentes aos volumes de pasta de cimento e de resina (nesta ordem) em um novo copo misturador, sendo a pasta novamente submetida a 4.000 rpm durante 15 s, seguida de uma rotação de 12.000 rpm durante 70 s, com o objetivo de promover a homogeneização dos componentes.

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão, as pastas foram vertidas em moldes cúbicos de 50 × 50 × 50 mm, previamente engraxados para facilitar a desmoldagem. Após a moldagem, as amostras foram submetidas ao processo de cura por 24 h a uma temperatura de 139 °F. Posteriormente, a resistência à compressão foi determinada utilizando uma máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph AGS-X, com capacidade máxima de 300 kN, e seguindo os procedimentos estabelecidos pela API RP 10B-2.

Para a caracterização reológica, as pastas foram inicialmente condicionadas em consistrômetro atmosférico Chandler Engineering, modelo 1200, sendo submetidas a uma rampa de temperatura até 102 °F, durante 30 min. Após o condicionamento, as propriedades reológicas foram determinadas utilizando um viscosímetro Chandler Engineering, modelo 3500, mediante leituras em diferentes velocidades de rotação. A partir dos dados obtidos, foram determinados os parâmetros reológicos das pastas, incluindo viscosidade plástica (VP), limite de escoamento (LE), gel inicial (Gi) e gel final (Gf).

Por fim, a caracterização morfológica das amostras foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de avaliar as alterações microestruturais promovidas pela incorporação da resina epóxi, incluindo sua distribuição na matriz cimentícia e a interação entre as fases polimérica e cimentícia.

Resultados e Discussões

O desempenho reológico das pastas constitui um importante parâmetro para os sistemas de cimentação, uma vez que as condições de bombeamento e deslocamento da pasta vão depender diretamente do comportamento viscoso da mesma [5]. Os resultados dos ensaios reológicos estão apresentados na Figura 1, que relaciona a tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento.

A pasta de referência apresentou o comportamento mais fluido entre todas, com um crescimento linear da tensão de cisalhamento. Para esta composição, foram obtidos os valores de viscosidade plástica, VP = 96,0 cP, e de limite de escoamento, LE = 1,26 lbf/100 pé², condizentes com o comportamento observado. Com a incorporação da resina epóxi, observa-se um aumento progressivo da resistência ao escoamento em relação à referência, mas que não ocorre uniformemente para todas as concentrações. As formulações C95-R5 e C90-R10 apresentaram comportamentos semelhantes entre si, já a C80-R20 apresentou um aumento significativo na viscosidade, principalmente até a taxa de cisalhamento de aproximadamente 160 s^{-1}, acima da qual a variação da tensão de cisalhamento torna-se mais constante.

Os valores de gel inicial (Gi) e gel final (Gf) também evidenciam as alterações no comportamento reológico promovido pela adição da resina. A pasta C95-R5 apresentou valores próximos aos da referência, enquanto C90-R10 e C80-R20 apresentaram valores progressivamente maiores. Os parâmetros de VP, LE, Gi e Gf obtidos para cada formulação também estão apresentados na Figura 1. Esses resultados indicam que possivelmente concentrações cada vez maiores de resina na pasta de cimento aumentam sua resistência ao escoamento.

Enquanto que as propriedades reológicas são fundamentais para a fase de bombeamento, a avaliação do desempenho mecânico sob compressão é essencial para garantir a integridade da matriz cimentícia após a cura. Os resultados de resistência à compressão das diferentes amostras para o período de cura de 24 horas estão apresentados na Figura 2.

Com a incorporação da fase polimérica, era esperado que a capacidade de deformação e a tenacidade da matriz fossem aprimoradas, porém os resultados experimentais mostraram redução da resistência à compressão com o aumento do teor de resina epóxi. Um comportamento semelhante, mas utilizando uma resina epóxi à base de água, foi observado por He et al. [5] em seu trabalho, que constatou a redução da resistência à compressão com o aumento do teor de resina epóxi. Entretanto, He et al. [5] também observaram que houve aumento da resistência à compressão para todas as formulações com o prolongamento do período de cura, embora permaneça inferior à das amostras constituídas por 100% de cimento. Além disso, outro fator que pode estar associado a

essa redução é o possível excesso de resina, que resulta na formação de aglomerados poliméricos [11] e na interferência da fase polimérica no processo de hidratação do cimento [12]. Em contrapartida, Lu et al. [4], ao avaliar a influência de uma resina epóxi à base de água, com e sem agente de cura, em sistema cimento-resina, demonstraram que após 7 dias de cura a 80 °C, os valores de resistência foram maiores que o sistema de referência de cimento Portland. Isso indica que o valor da resistência não depende apenas do teor de resina incorporado, mas também das características do sistema polimérico, da compatibilidade com a fase cimentícia, das condições e do tempo de cura. Como as amostras deste trabalho foram avaliadas apenas após 24 horas, não é possível afirmar a partir dos resultados obtidos que o prolongamento da cura necessariamente supera em algum momento a resistência da pasta de referência.

Após os ensaios de compressão, a superfície de fratura das amostras de cada composição foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), o que permitiu investigar a morfologia para cada formulação e buscar relações entre as características microestruturais e o comportamento mecânico observado. Nas amostras contendo resina epóxi, foram identificadas estruturas na forma de filmes reticulados e partículas esféricas atribuídas à fase polimérica (Figura 3). A formação dessas estruturas pode estar associada à segregação e aglomeração da fase polimérica durante sua dispersão na matriz cimentícia [11].

Estruturas semelhantes foram relatadas por Lu et al. [4], que também identificaram filmes e partículas esféricas em sistemas cimento-resina. Segundo os autores, a formação dessas esferas pode estar associada à presença do agente de cura e às condições de temperatura, sendo observado aumento do diâmetro das partículas com o aumento da temperatura de cura.

Nas micrografias obtidas neste trabalho, foram observadas esferas em todas as formulações contendo o polímero. Na composição C95-R5, verificou-se menor quantidade dessas estruturas quando comparada às demais formulações. Já as amostras C90-R10 e C80-R20, além de apresentarem maior quantidade de esferas, apresentaram partículas com dimensões maiores, com diâmetros médios aparentes de 17,8 µm e 23,0 µm, respectivamente, determinados através da análise das micrografias no software ImageJ. Essa observação sugere uma possível relação entre o teor de resina incorporado e as características morfológicas das partículas formadas, embora os resultados disponíveis não sejam suficientes para estabelecer uma relação causal.

Outro aspecto relevante observado nas micrografias foi a interface entre as esferas e a matriz cimentícia. Na formulação C95-R5, as partículas apresentaram-se recobertas por agregados da matriz de cimento, indicando maior contato entre as fases. Por outro lado, nas formulações com maiores concentrações de resina, C90-R10 e C80-R20, foram observadas regiões de descolamento na interface esfera-matriz. Bahraq et al. [13], embora tenham utilizado um sistema distinto, demonstraram que a presença de água pode afetar a adesão entre as diferentes fases. Portanto, o comportamento mecânico observado pode ser associado ao nível de adesão entre a fase cimentícia e a fase polimérica, isso porque em materiais compósitos, a transferência de esforços entre as fases depende da interação interfacial [14]. Em sistemas cimentícios multifásicos, uma interface com baixa adesão pode constituir caminho para propagação de trincas [15]. Dessa forma, o descolamento observado nas micrografias pode contribuir para uma transferência menos eficiente dos esforços mecânicos entre a matriz cimentícia e a fase

polimérica, resultando na propagação de trincas, constituindo uma possível explicação para a redução da resistência à compressão com o aumento da concentração de resina.

Em sua pesquisa, Lu et al. [4] relacionaram o aparecimento de poros de maiores dimensões na estrutura à formação das esferas. E isto pode ser corroborado pela teoria que diz que quando a interface partícula-matriz está muito fraca, ocorre descolamento interfacial, resultando na nucleação de microcavidades [16, p. 140]. Assim, a presença desses vazios também pode contribuir para a redução da resistência mecânica. Conforme discutido por Neville [2, p. 285-291], a resistência dos materiais cimentícios é fortemente influenciada pela presença de vazios, sendo relevantes não apenas seu volume, mas também sua geometria e distribuição.

Assim, os resultados obtidos sugerem que o desempenho do sistema depende não somente da presença da resina, mas também de sua distribuição e interação com a matriz cimentícia. Nas condições avaliadas neste trabalho, o aumento da quantidade de esferas, associado ao possível descolamento interfacial observado nas formulações com maiores teores de resina, apresentam-se como potencial fator para contribuir na redução da resistência à compressão após 24 horas de cura.

Conclusão

A incorporação da resina epóxi a matriz cimentícia promoveu alterações significativas no comportamento reológico, mecânico e microestrutural das pastas cimentícias. O aumento do teor de resina elevou a resistência ao escoamento das formulações, sendo este mais pronunciado para a composição C80-R20. Em relação ao comportamento mecânico, observou-se redução progressiva da resistência à compressão com o aumento da fração polimérica, para um período de cura de 24 horas.

A caracterização por MEV revelou estruturas atribuídas à fase polimérica no formato de filmes e partículas esféricas, cuja quantidade e dimensões tendem a aumentar nas formulações com maiores teores de resina. Nessas formulações inclusive, foram observadas regiões que pronunciam um descolamento na interface entre as partículas esféricas e a matriz cimentícia. Esses resultados sugerem que para as condições avaliadas, tanto a distribuição da fase polimérica, quanto a sua interação com a matriz cimentícia podem ter influenciado o comportamento mecânico do sistema. Entretanto, análises complementares são necessárias para avaliar a influência da porosidade na resistência mecânica e química do sistema, e para compreender quais mecanismos estão presentes na interface cimento-epóxi.

Referências

[1] XIE, Yan; TIONG, Michelle; LIU, Qi; WU, Tong; XUE, Wanzhen; WANG, Chunkai. Recent advancements in durable and self-healing oil well cement: A pathway

to secure carbon sequestration. Journal of CO2 Utilization, v. 92, art. 103036, 2025. DOI: 10.1016/j.jcou.2025.103036.

[2] NEVILLE, Adam M. Properties of concrete. 5. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2011.

[3] PENG, Zhigang; ZHANG, Shirong; FENG, Qian; ZHENG, Yong. Effects of self-emulsifying and self-crosslinking epoxy resin on the mechanical properties of oil well cement stone. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 727, art. 138199, 2025. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.138199.

[4] LU, Haichuan; ZHANG, Tianyi; TIAN, Leiju; ZHANG, Xiangrui; ZOU, Jianlong; LI, Yange; GUO, Yihui. Effect of the presence or absence of curing agent on the properties of resin–Portland cement composite for oil and gas wells. Geoenergy Science and Engineering, v. 255, art. 214120, 2025. DOI: 10.1016/j.geoen.2025.214120.

[5] HE, Miao; SONG, Jianjian; XU, Mingbiao; HE, Lei; XU, Peng. Effect of epoxy resin emulsion on the mechanical properties of oil well cement-based composites. Advances in Civil Engineering, v. 2020, art. 5344866, 2020. DOI: 10.1155/2020/5344866.

[6] ZHANG, Xiaofeng; PENG, Zhigang; FENG, Qian; ZHENG, Yong; CHEN, Xuewen; ZHANG, Bojian; ZHANG, Haojun. Study on reducing the brittleness of oil well cement by preparing nano-SiO2/epoxy resin composite elastic microspheres based on Pickering emulsion. Construction and Building Materials, v. 416, art. 135143, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135143.

[7] SHILL, Sukanta Kumer; AL-DEEN, Safat; ASHRAF, Mahmud; ELAHI, Manjur A.; SUBHANI, Mahbube; HUTCHISON, Wayne. A comparative study on the performance of cementitious composites resilient to airfield conditions. Construction and Building Materials, v. 282, art. 122709, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122709.

[8] COTA, F. P.; ALVES, R. A. A.; PANZERA, T. H.; STRECKER, K.; CHRISTOFORO, A. L.; BORGES, P. H. R. Physical properties and microstructure of ceramic–polymer composites for restoration works. Materials Science and Engineering: A, v. 531, p. 28–34, 2012. DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.003.

[9] LENG, Guangyao; YAN, Wei; TANG, Qing; LI, Juan; XU, Zhengxian; JIANG, Xiaohui; HAN, Yue; ZHANG, Chen; LI, Zhong. Exploring epoxy resin sealants for sustained casing pressure mitigation in the wellbore. Construction and Building Materials, v. 413, art. 134945, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134945.

[10] PENG, Zhigang; LV, Falin; FENG, Qian; ZHENG, Yong. Enhancing the CO2-H2S corrosion resistance of oil well cement with a modified epoxy resin. Construction and Building Materials, v. 326, art. 126854, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126854.

[11] LI, Cong; XIAO, Huigang; LIU, Min; WANG, Wei; XU, Fan. Optimised repairment properties of waterborne epoxy resin–cement composite material: An

experimental and simulation study. Construction and Building Materials, v. 406, art. 133401, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133401.

[12] SUN, Pore-Feng; SAUER, J. A.; NAWY, E. G. Properties of epoxy-cement mortar systems. Materials Science and Engineering, v. 18, p. 85–95, 1975.

[13] BAHRAQ, Ashraf A.; AL-OSTA, Mohammed A.; AL-AMOUDI, Omar S. Baghabra; OBOT, I. B.; ADESINA, Akeem Y.; MASLEHUDDIN, Mohammed. A nanoscale adhesion mechanism of cement-epoxy interface under varying moisture conditions: A molecular dynamics study. Surfaces and Interfaces, v. 35, art. 102446, 2022. DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102446.

[14] CHAWLA, Krishan K. Composite Materials: Science and Engineering. 2. ed. New York: Springer, 1998.

[15] MARTUSCELLI, Carolina Coelho; SANTOS, Júlio Cesar dos; OLIVEIRA, Pablo Resende; PANZERA, Túlio Hallak; AGUILAR, Maria Teresa Paulino; GARCIA, Carlos Thomas. Polymer-cementitious composites containing recycled rubber particles. Construction and Building Materials, v. 170, p. 446–454, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.017.

[16] MEYERS, Marc André; CHAWLA, Krishan Kumar. Princípios de metalurgia mecânica. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982.

Anexos



Figura 1 - Resultados dos ensaios reológicos de todas as formulações (Autoria própria).



Figura 2 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão (Autoria própria).



Figura 3 - Micrografias das superfícies de fratura das formulações REF (a, e), C95-R5 (b, f), C90-R10 (c, g) e C80-R20 (d, h), obtidas em diferentes ampliações (Autoria própria).

CÓDIGO: ET1667

AUTOR: LUIZ FELIPE DE LUCENA LIMA

COAUTOR: LUIZ FELIPE DE QUEIROZ SILVEIRA

ORIENTADOR: FABIO DALMAZZO SANCHES

TÍTULO: Manutenção Preditiva Baseada em Análise de Vibrações: Transformada de Fourier, Envelope e Aplicações em Rolamentos

Resumo

O diagnóstico precoce de falhas em mancais de rolamento é fundamental para evitar paradas não planejadas e prejuízos industriais. Este trabalho analisa o desempenho da Análise de Envelope em comparação à análise espectral clássica via Transformada Rápida de Fourier (FFT) direta no diagnóstico de defeitos em rolamentos. A metodologia utiliza sinais de vibração do banco de dados da Case Western Reserve University (CWRU), contemplando falhas na pista interna, pista externa e elementos rolantes. Avaliaram-se a capacidade de identificação das frequências características de falha (BPFO, BPFI e BSF) e o papel da filtragem passa-banda. Os resultados indicaram que o espectro de vibração global (FFT) apresenta limitações na detecção de defeitos incipientes, uma vez que a energia dos impactos de curta duração se distribui ao longo de frequências ressonantes e acaba mascarada pelo ruído operacional. Em contrapartida, a Análise de Envelope, aplicada via demodulação por Transformada de Hilbert e espectro do envelope ao quadrado, isolou com clareza as frequências de falha e suas bandas laterais nos três casos. Conclui-se que a Análise de Envelope supera a análise espectral direta, consolidando-se como uma ferramenta indispensável para a manutenção preditiva.

Palavras-chave: rolamentos; análise de envelope; vibrações; FFT; diagnóstico de falha.

TITLE: Vibration-Based Predictive Maintenance: Fourier Transform, Envelope Analysis, and Applications in Rolling Bearings

Abstract

Early fault diagnosis in rolling element bearings is essential to prevent unplanned downtime and financial losses in industrial machinery. This study evaluates the performance of Envelope Analysis compared to direct Fast Fourier Transform (FFT) spectral analysis for bearing defect diagnosis. The methodology utilizes vibration signals from the Case Western Reserve University (CWRU) database, encompassing

faults in the inner race, outer race, and rolling elements. The identification capability of characteristic fault frequencies (BPFO, BPFI, and BSF) and the role of bandpass filtering were assessed. Results indicated that direct vibration spectra (FFT) present limitations in detecting incipient faults, as impulse energy is distributed across resonance bands and masked by operational noise. Conversely, Envelope Analysis, implemented via Hilbert transform demodulation and squared envelope spectrum, successfully isolated characteristic fault frequencies and modulation sidebands in all three scenarios. It is concluded that Envelope Analysis overcomes the limitations of direct spectral analysis, proving to be an indispensable tool for predictive maintenance.

Keywords: rolling bearings; envelope analysis; vibrations; FFT; fault diagnosis.

Introdução

Mancais de rolamento são componentes fundamentais em máquinas rotativas e amplamente utilizados industrialmente. Mesmo sob condições ideais de montagem e lubrificação, esses componentes estão sujeitos a falhas por fadiga natural. Nesse contexto, uma falha em um rolamento pode resultar em grande prejuízo financeiro associado a paradas não planejadas, o que torna indispensável o uso de técnicas para sua detecção precoce. Atualmente, técnicas baseadas em análise de vibrações são as mais comuns, e entre elas se destaca a Análise de Envelope, também conhecida como demodulação em amplitude, que será o foco deste estudo.
O presente trabalho tem como objetivo revisar conceitos básicos referentes à forma como defeitos localizados se apresentam em rolamentos, descrever e demonstrar o funcionamento da Análise de Envelope em sinais reais de falha disponibilizados pela Case Western Reserve University (CWRU), além de comparar os resultados obtidos com a análise de espectro clássica, obtida pela aplicação direta da Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre o sinal de vibração.

Metodologia

Estruturalmente, um rolamento de esferas é composto por quatro componentes mecânicos: pistas interna e externa (anéis), elementos rolantes (esferas) e gaiola (Fig. 1). As pistas atuam como guias de contato para as esferas, que transmitem as cargas e minimizam o atrito, enquanto a gaiola mantém o espaçamento equidistante entre os elementos rolantes. No arranjo experimental da CWRU, a pista interna gira em conjunto com o eixo do motor, enquanto a pista externa permanece fixa na carcaça.
Mesmo se geometricamente perfeitos, rolamentos submetidos a cargas radiais ainda geram vibrações inerentes à sua operação mecânica. Durante a operação, o número de elementos rolantes e sua posição em relação à zona de carregamento mudam conforme o giro do rolamento, dando origem a uma variação periódica na rigidez do sistema. Como consequência, microfissuras surgem no material ao longo do tempo, inicialmente sob a superfície, e eventualmente evoluem para falhas. O modo de falha predominante nos rolamentos é o lascamento (spalling) das pistas ou dos elementos rolantes (TANDON; CHOUDHURY, 1999).
Defeitos localizados em rolamentos possuem a distintiva característica de gerar impactos periódicos de curta duração, associados ao contato de uma superfície com a falha. Esses impulsos ocorrem à frequência característica de falha e excitam a estrutura

do sistema eixo-mancal, resultando em um aumento da energia de vibração nas suas frequências de ressonância, normalmente acima de 5 kHz em mancais (TANDON; CHOUDHURY, 1999). Isso pode ser monitorado no espectro base de vibrações; contudo, a menos que o defeito seja suficientemente grande, a energia dos impactos se distribui em múltiplas harmônicas e é mascarada pelo ruído global do espectro. Além disso, a presença de frequências nas bandas de ressonância não permite diagnosticar a origem da excitação, que pode ser externa à máquina ou decorrente do seu funcionamento normal.

A Análise de Envelope é uma técnica importante de processamento de sinais que consiste na extração da onda moduladora de um sinal modulado, seguida da análise de seu espectro de frequências. Na modulação em amplitude, as amplitudes de um sinal de alta frequência (portador) são modificadas por um sinal de baixa frequência (modulador). O envelope é o produto final da demodulação, e pode ser descrito como o contorno gerado pelos picos das amplitudes do sinal modulado (ARATO JUNIOR, 1994), conforme ilustrado na Figura 2.

Atualmente, a aplicação numérica da transformada de Hilbert consolidou-se como a técnica moderna mais comum e eficaz para obtenção do envelope (RANDALL; ANTONI, 2011). Trata-se de uma operação que desloca a fase de todas as componentes de frequência do sinal em 90 graus sem que a sua amplitude ou o seu domínio sejam alterados. A partir desse deslocamento, é possível construir um novo sinal complexo z(t), chamado de sinal analítico, no qual o sinal de vibração original x(t) representa a parte real, e o sinal deslocado pela transformada de Hilbert H[x(t)] compõe a parte imaginária:

z(t) = x(t) + j * H[x(t)]

O envelope A(t) que buscamos corresponde à amplitude instantânea do sinal analítico, obtida pelo cálculo do seu módulo:

A(t) = √[x(t)^2 + H[x(t)]^2]

No contexto do diagnóstico de falhas, as ressonâncias da estrutura são moduladas em amplitude pelos impactos do defeito. A frequência com que os impactos ocorrem é chamada de frequência característica de falha, e seu valor teórico é calculado a partir da velocidade de rotação e da geometria do rolamento, com dados fornecidos pelo fabricante. Ao comparar a frequência teórica calculada com a frequência extraída por meio da Análise de Envelope, é possível identificar o componente do rolamento em que a falha está localizada. Os valores fornecidos pelo fabricantes são baseados nas seguintes equações:

Frequência de falha na pista externa (BPFO): **BPFO = (n/2) * fr * [1 - (d/D) * cos(α)]**

Frequência de falha na pista interna (BPFI): **BPFI = (n/2) * fr * [1 + (d/D) * cos(α)]**

Frequência de falha dos elementos rolantes (BSF): **BSF = (D/2d) * fr * [1 - ((d/D) * cos(α))^2]**

Frequência da gaiola (FTF): **FTF = (fr/2) * [1 - (d/D) * cos(α)]**

Nelas, 'n' representa o número de elementos rolantes, 'fr' corresponde à frequência mecânica de rotação do eixo, 'd' é o diâmetro do elemento rolante, 'D' é o diâmetro primitivo do rolamento (pitch diameter) e 'α' denota o ângulo de contato mecânico. Os parâmetros relacionados à geometria do rolamento estão representados na Figura 3.

É importante ressaltar que as equações fornecidas são aproximações. Como afirmam McFadden e Smith (1984), rolamentos em condições reais de funcionamento apresentam deslizamento nos seus elementos rolantes. A variação resultante, no entanto, tipicamente está na faixa de 1% a 2% (RANDALL; ANTONI, 2011), permitindo que o deslizamento seja desprezado na maioria dos casos.

Quando a falha está localizada em um componente que se move em relação à zona de

carregamento, ocorre ainda uma segunda modulação em amplitude. A energia dos impactos é modulada pela variação periódica da força de contato sobre o defeito, que se intensifica à medida que este transita por essa região de maior compressão. Esse fenômeno é visível no espectro de vibração na forma de bandas laterais ao redor da frequência característica de falha e seus harmônicos.

Para a validação do método, serão analisados três sinais de vibração distintos do banco de dados da CWRU, provenientes de três rolamentos SKF 6205-2RS JEM com falhas localizadas na pista interna, na pista externa e nos elementos rolantes (esferas). Cada sinal será processado em duas etapas analíticas. A primeira consiste na geração do espectro base por meio da FFT direta, a fim de avaliar a visibilidade das falhas no domínio da frequência convencional. A segunda etapa aplica a Análise de Envelope, empregando um filtro passa-banda ao redor das frequências de ressonância para evidenciar as modulações em amplitude provocadas pelos impactos da falha.

Resultados e Discussões

Para a obtenção do espectro final, a literatura especializada recomenda o uso do espectro do envelope ao quadrado (Squared Envelope Spectrum). Conforme demonstrado por Randall e Antoni (2011), essa abordagem evita distorções matemáticas no processamento digital e destaca a energia dos impactos em relação ao ruído de fundo, evidenciando as frequências de falha com maior clareza.

O primeiro sinal testado é o 133DE, correspondente a uma falha na pista externa de um rolamento localizado no lado de acionamento (drive end) de um eixo a 1730 RPM. O tamanho da falha é 0,007 pol., o menor disponível no banco de dados da CWRU, e o rolamento foi posicionado de forma que a falha está diretamente sob a região de carga. A Figura 4 mostra o sinal de vibração deste rolamento no domínio tempo, com os impactos da falha indicados pelas linhas tracejadas.

Nota-se que os impactos, espaçados pelo inverso da frequência característica de falha, são visíveis mesmo sem passar por qualquer tipo de processamento. Este caso representa um cenário ideal para o diagnóstico de falhas, em que outras fontes de vibração são minimizadas. A Figura 5 mostra o espectro desse sinal, obtido por meio da aplicação da FFT.

Pelo espectro completo, de 0 a 6 kHz para uma taxa de amostragem de 12 kHz, constata-se que mesmo em um caso ideal, a energia de vibração da falha é mínima em relação a outras fontes de vibração. Apesar disso, além de um pequeno pico na BPFO, indicada no espectro completo pela linha traço-ponto, observa-se uma região de excitação em torno da frequência de ressonância do sistema eixo-mancal, próxima de 5 kHz. No espectro ampliado, admitindo o pico mais alto como a frequência de ressonância, podemos constatar a presença de harmônicas da BPFO à esquerda e à direita do pico.

Para a Análise de Envelope, o mesmo sinal é submetido ao processo de demodulação por meio da transformada de Hilbert. O envelope resultante é ilustrado na Figura 6, sobreposto sobre o sinal bruto. O espectro do quadrado desse envelope é então extraído, revelando com clareza as harmônicas da frequência de falha na Figura 7.

No campo da teoria, para uma falha que permanece estática em relação à zona de carregamento, como é o caso da que está em análise, não deveriam aparecer bandas

laterais em volta da frequência de falha (SMITH; RANDALL, 2015), como as destacadas pelas linhas amarelas. Nesse caso, é possível identificar que o valor que separa as bandas da frequência de falha é precisamente a frequência de rotação do eixo, indicando que os impactos estão sendo modulados por uma carga dinâmica adicional, resultante de um desbalanceamento.

O segundo sinal a ser analisado é o 209DE, que corresponde a uma falha na pista interna, rotacionando a 1797 RPM. O tamanho da falha também é 0,007 polegadas. O sinal de vibração no domínio do tempo (Fig. 8) evidencia a modulação em amplitude exercida pela força de contato atuante sobre um defeito móvel, descrita na seção anterior.

O seu espectro (Fig. 9) também possui um pequeno pico na frequência característica de falha, que seria mascarado em meio a outras frequências sem o conhecimento prévio do seu valor exato. Diferentemente do caso anterior, porém, não aparece uma região de excitação claramente delimitada nas ressonâncias da estrutura. Isso é um obstáculo para o diagnóstico da falha com o uso deste método, sendo necessário um método mais robusto.

A aplicação das etapas de demodulação e FFT do envelope (Fig. 10) resulta em picos evidentes nas harmônicas da frequência característica de falha, facilmente identificáveis. De acordo com o comportamento esperado para falhas na pista móvel, surgem também bandas laterais expressivas, indicadas pelas linha amarelas, que representam a modulação em amplitude sofrida pelos impactos.

Conforme tipicamente recomendado na literatura, o mesmo sinal também foi testado com um filtro passa-banda aplicado, de 4 kHz a 5,8 kHz, seguido das etapas da Análise de Envelope (Fig. 11). Essa faixa foi definida por meio de um método manual de “tentativa e erro”, como coloca Bezerra (2004), visto que não temos conhecimento das frequências de ressonância da estrutura. Em aplicações mais robustas, a faixa do filtro é definida por meio de técnicas como a curtose espectral.

Para este sinal, a aplicação do filtro resultou em uma melhoria mínima na clareza das harmônicas mais distantes da fundamental. A diferença não é tão expressiva porque os dados da CWRU já possuem uma alta relação sinal-ruído. Os benefícios da etapa da filtragem são mais sentidos em sinais ruidosos, com múltiplas fontes externas de vibração.

Por fim, é feito o diagnóstico de uma falha de 0,028 pol. em um elemento rolante, representada pelo sinal 3007DE (Fig. 12), com o eixo girando a 1750 RPM. No banco de dados da CWRU, esse tipo de falha é citado por Smith e Randall (2015) como sendo o mais difícil de diagnosticar. Visualmente, de fato é o sinal com comportamento mais irregular no domínio do tempo, devido às modulações em amplitude supracitadas em falhas móveis, junto ao movimento individual das esferas em torno do próprio eixo (tumbling).

Nota-se que as linhas tracejadas preditivas não se alinham perfeitamente com os picos transientes do gráfico. Essa discrepância pode ser atribuída, em parte, ao deslizamento na interface esfera-pista. Deve-se considerar também as flutuações instantâneas na rotação do motor, inerentes a operações reais.

No domínio da frequência (Fig. 13), novamente observa-se que o pico da frequência característica de falha se perde em meio outros picos de mesma ou maior amplitude. Ao mesmo tempo, não é possível distinguir uma região específica de excitação de ressonâncias. Sem o conhecimento dessas frequências, o espectro base se mostra insuficiente para diagnosticar o sinal.

Após a aplicação do filtro passa-banda na faixa de 2,65 kHz a 5 kHz, definida por uma abordagem iterativa manual, foi extraído o envelope do sinal no domínio do tempo, e

sobre ele foi aplicada a FFT. O espectro resultante (Fig. 14) apresenta todas as características definidas por Smith e Randall (2015) para falhas em um elemento rolantes: a frequência de falha (BSF) e seus harmônicos, indicados pela linha traço-ponto vermelha, as bandas laterais espaçadas pela frequência da gaiola (FTF), indicados pelas linhas amarelas, e harmônicos da frequência da gaiola, indicados pelas linhas pontilhadas azuis.

A análise dos três cenários experimentais demonstra que a utilização exclusiva do espectro de vibração global (FFT) apresenta limitações práticas na identificação de defeitos incipientes em rolamentos, visto que há nuâncias nos sinais de falha de cada componente que não são visíveis no espectro convencional. Enquanto a falha na pista externa, por ser estática, apresentou transientes evidentes desde a análise no domínio do tempo, os defeitos na pista interna e nos elementos rolantes introduziram modulações em amplitude características da passagem rotativa pela zona de carga. Em todos os três cenários extraídos da base CWRU, o espectro de frequências convencional falhou em isolar o defeito de forma incontestável, pois as frequências teóricas não apresentavam destaque em relação às demais harmônicas do sistema. Em contraste, a Análise de Envelope obteve êxito ao extrair as frequências BPFO, BPFI e BSF.

A aplicação de um filtro passa-banda prévio à análise de envelope é fundamentada na necessidade de isolar as ressonâncias estruturais excitadas pelos defeitos mecânicos (RANDALL; ANTONI, 2011). No escopo dos dados da CWRU, contudo, essa etapa não se provou estritamente essencial, uma vez que a natureza controlada do experimento confere aos sinais uma relação sinal-ruído excepcionalmente alta. Todavia, a adoção de filtros bem posicionados, frequentemente otimizados por métodos como a curtose espectral, permanece indispensável no monitoramento prático de maquinário industrial complexo.

Conclusão

Este trabalho apresentou um estudo sobre o diagnóstico de falhas em rolamentos por meio da análise de vibrações, estabelecendo um comparativo prático entre a análise do espectro de vibração global e a técnica de Análise de Envelope. Como discutido ao longo do texto, defeitos localizados nos componentes do mancal possuem a característica física de gerar impactos periódicos de curta duração. Esses impulsos atuam como forças de excitação que modulam em amplitude as frequências naturais da estrutura, operando em um ritmo ditado pelas frequências características de falha.

A partir da primeira etapa da comparação, ficou evidente a limitação do espectro de vibração global, obtido pela aplicação direta da FFT sobre o sinal bruto, para a realização do diagnóstico. Constatou-se que a energia dos impactos de curta duração se distribui ao longo de múltiplas harmônicas nas zonas de alta frequência. Consequentemente, a energia do defeito acaba frequentemente mascarada pelo ruído operacional da máquina e por outros tipos de falha como o desbalanceamento, dificultando a sua identificação.

Para superar essas limitações, a Análise de Envelope foi aplicada sobre três sinais de vibração provenientes de rolamentos distintos, representando falhas isoladas na pista interna, na pista externa e nos elementos rolantes. Os espectros de envelope resultantes confirmaram a superioridade do método em isolar a frequência característica de falha,

evidenciando seus picos de forma clara para os três componentes estudados. Conclui-se, portanto, que enquanto a análise espectral direta se mostra limitada frente ao mascaramento pelo ruído, a Análise de Envelope permite um diagnóstico preciso, demonstrando que é uma ferramenta indispensável na manutenção preditiva moderna.

Referências

ARATO JUNIOR, Adyles. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações**. Barueri: Manole, 1994.

BEZERRA, Roberto de Araújo. **Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração**. 2004. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY. **Bearing Data Center**. Cleveland, [s.d.]. Disponível em: <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter>. Acesso em: 30 mar. 2026.

MCFADDEN, P. D.; SMITH, J. D. Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique: a review. **Tribology International**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 3-10, fev. 1984.

SKF. **Componentes e materiais**. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/general-bearing-knowledge/bearing-basics/components-and-materials>. Acesso em: 24 ago. 2026.

RANDALL, Robert B.; ANTONI, Jérôme. Rolling element bearing diagnostics: a tutorial. **Mechanical Systems and Signal Processing**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 485-520, 2011.

SMITH, Wade A.; RANDALL, Robert B. Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: a benchmark study. **Mechanical Systems and Signal Processing**, [S. l.], v. 64-65, p. 100-131, 2015.

TANDON, N.; CHOUDHURY, A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. **Tribology International**, [S. l.], v. 32, n. 8, p. 469-480, 1999.

Anexos



Figura 1 – Componentes estruturais de um rolamento de esferas rígido. Fonte: SKF (2026)



Figura 2 – Demodulação de um sinal; (a) sinal portador; (b) sinal modulador; (c) sinal modulado; (d) envelope do sinal modulado. Fonte: Bezerra (2004).



Figura 3 – Parâmetros geométricos do rolamento; (a) frequência de rotação do eixo; (b) diâmetro de esfera e diâmetro primitivo; (c) ângulo de contato. Fonte: Adaptado de Bezerra (2004).



Figura 4 – Sinal de vibração 133DE no domínio do tempo. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).



Figura 5 – Espectro do sinal 133DE; (a) espectro completo; (b) espectro ampliado na zona de ressonância. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).



Figura 6 – Envelope do sinal 133DE sobreposto sobre o sinal bruto. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).



Figura 7 – Espectro do quadrado do envelope do sinal 133DE. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).



Figura 8 – Sinal de vibração 209DE no domínio do tempo. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).



Figura 9 – Espectro completo sinal 209DE. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).



Figura 10 – Espectro do quadrado do envelope do sinal 209DE. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).



Figura 11 – Espectro do quadrado do envelope do sinal 209DE após filtragem passa-banda. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).



Figura 12 – Sinal de vibração 3007DE no domínio do tempo. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).



Figura 13 – Espectro completo sinal 3007DE. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).



Figura 14 – Espectro do quadrado do envelope do sinal 3007DE após filtragem passa-banda. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

CÓDIGO: ET1673

AUTOR: JOAO VICTOR FERREIRA DE ARAUJO CAPISTRANO

ORIENTADOR: THIAGO DE OLIVEIRA ALVES ROCHA

TÍTULO: Implementação de um sistema fotovoltaico controlado no modo tensão, com armazenamento e transição suave entre conectado/ilhado e ilhado/conectado.

Resumo

O crescimento da demanda por Fontes de Energia Renovável (FREs), impulsionado por questões ambientais, tem alavancado a integração de Sistemas de Geração Distribuída (SGDs) à rede elétrica. Este trabalho aborda o desenvolvimento e a fundamentação teórica para a implementação de um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia, operando em modo tensão e dotado de capacidade de transição suave (seamless transfer) entre os estados conectado à rede e ilhado. Em virtude do estágio inicial da pesquisa, as atividades concentraram-se no levantamento bibliográfico e no estudo de conversores estáticos, inversores CC-CA e técnicas avançadas de controle, incluindo o controle por caimento (droop control) e estruturas em cascata. Com o auxílio das ferramentas computacionais MATLAB/Simulink e PSIM, foram investigados conceitos de sincronismo via Phase-Locked Loop (PLL) e transformações de Park (referencial dq0), preparando o arcabouço necessário para o futuro controle da planta de potência.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos; Inversores; Modo Tensão; Transição Suave

TITLE: Implementation of a photovoltaic system controlled in voltage mode, with storage and seamless transfer between connected/islanded and islanded/connected.

Abstract

Abstract: The growing demand for Renewable Energy Sources (RES), driven largely by environmental concerns, has accelerated the integration of Distributed Generation Systems (DGS) into the electrical grid. This work addresses the development and theoretical foundation for implementing a photovoltaic system with energy storage, operating in voltage mode and equipped with seamless transfer capability between grid-connected and islanded modes. Due to the initial stage of the research, activities focused on literature review and the study of static converters, DC-AC inverters, and advanced control techniques, including droop control and cascade structures. Using

MATLAB/Simulink and PSIM as computational tools, concepts of synchronization via Phase-Locked Loop (PLL) and Park transformations (dq0 reference frame) were investigated, laying the necessary groundwork for the future control of the power plant.

Keywords: Photovoltaic Systems; Inverters; Voltage Mode; Seamless Transfer

Introdução

Nos últimos tempos, tem-se intensificado a demanda por uma participação maior de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, impulsionada principalmente por diretrizes ambientais. Nesse cenário, os Sistemas de Geração Distribuída (SGDs) emergem como uma solução fundamental para integrá-las ao sistema elétrico e atender a demandas regionais. Dentre os modos de operação de um SGD, destacam-se: modo corrente (grid-following), modo tensão (grid-forming), além dos modos com suporte à rede (grid-supporting), tanto em tensão quanto em corrente. Independentemente do modo, os SGDs são conectados à rede por meio do Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Sistemas operantes em modo corrente dependem estritamente da presença da rede elétrica, atuando essencialmente como injetores de potência. Em contrapartida, os sistemas em modo tensão possuem capacidade autônoma de operação, característica indispensável para a formação de microrredes. Nesse contexto, este trabalho aborda o desenvolvimento e a fundamentação para a implementação de um sistema fotovoltaico dotado de armazenamento de energia e capacidade de transição suave (seamless transfer) entre os modos de operação conectado à rede e ilhado. Dada a complexidade inerente ao controle de inversores e à necessidade de sincronismo via Phase-Locked Loop (PLL) e transformações de coordenadas, o projeto concentra-se na estruturação de modelos computacionais em ambiente MATLAB/Simulink e PSIM, visando viabilizar o controle da planta de potência e garantir a estabilidade do sistema diante de perturbações e mudanças de estado.

Metodologia

A metodologia foi estruturada em três frentes: fundamentação teórica, aspectos computacionais e estudo de estratégias de controle para SGDs. Inicialmente, realizou-se uma revisão sobre análise de circuitos, princípios de eletrônica de potência (conversores CC-CC e CC-CA), técnicas de controle aplicadas a esses dispositivos e fundamentos da geração fotovoltaica. Em seguida, aprofundou-se o estudo sobre os modos de funcionamento dos SGDs, com ênfase no modo tensão devido à sua aptidão para a operação em modo ilhado. Também foram investigados os conceitos referentes à operação em modo conectado e ilhado, bem como os requisitos normativos para a transição entre ambos. Como base bibliográfica, utilizaram-se videoaulas fornecidas pelo orientador, artigos científicos e trabalhos de conclusão de curso com temática correlata, essenciais para a compreensão da arquitetura do sistema, estratégias de modelagem e malhas de controle. Paralelamente, o software PSIM foi empregado na simulação dos circuitos elétricos e diagramas de controle, enquanto o MATLAB foi utilizado para o suporte aos cálculos matemáticos necessários ao dimensionamento.

Resultados e Discussões

Como resultado da etapa inicial, obteve-se uma base conceitual sólida para o desenvolvimento do sistema fotovoltaico com armazenamento, voltado à operação híbrida (conectada e ilhada) com transição suave. O levantamento bibliográfico permitiu compreender a dinâmica dos SGDs e as estratégias de controle aplicáveis ao problema da transição. No escopo do controle, foram analisadas estruturas de controle descentralizado por caimento (droop control) e controle em cascata, aplicadas a inversores em modo tensão. Além disso, estudaram-se as transformações de referenciais trifásicos senoidais (abc) para bifásicos síncronos (alpha-beta-0 e dq0) por meio das transformadas de Clarke e Park, bem como o uso do SRF-PLL (Synchronous Reference Frame - Phase-Locked Loop) para a estimação do ângulo da tensão da rede, garantindo o sincronismo do inversor. O uso integrado do PSIM e do MATLAB possibilitou a validação teórica por meio de representações computacionais, conferindo maior intuição sobre o comportamento físico dos SGDs. A partir dessa fundamentação, idealizou-se a arquitetura geral do sistema — integrando geração fotovoltaica, banco de baterias, inversor, filtragem de saída e conexão ao PAC. A análise também evidenciou os desafios técnicos da transição suave: no ilhamento, detectado por métodos como o OUV (Over/Under Voltage), o inversor deve assumir o papel de manter tensão e frequência estáveis para a microrrede; já na reconexão, exige-se a estrita compatibilização das grandezas elétricas do inversor com as da rede, em conformidade com a norma ABNT NBR 16149:2013. Dessa forma, embora os resultados desta fase tenham caráter predominantemente formativo, consolidaram-se conhecimentos essenciais em eletrônica de potência, modelagem e controle de sistemas fotovoltaicos.

Conclusão

A etapa inicial do projeto consolidou o arcabouço teórico e prático necessário para a implementação de um sistema fotovoltaico com armazenamento, operando em modo tensão e com capacidade de transição suave entre os estados ilhado e conectado. O estudo aprofundado dos SGDs evidenciou as limitações dos sistemas em modo corrente frente à dependência da rede, destacando as vantagens do modo tensão para a autonomia de microrredes. Adicionalmente, foram aprofundados os conceitos da eletrônica de potência, estratégias de controle (como droop e malhas em cascata) e transformações de coordenadas (Clarke e Park). As ferramentas computacionais PSIM e MATLAB revelaram-se indispensáveis para a simulação de circuitos e o suporte analítico ao projeto. Por fim, a definição da arquitetura do sistema permitiu mapear os principais pontos críticos da transição entre os modos de operação, abrindo caminho para as próximas etapas de implementação e validação prática.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16149:2013: Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

R. Sousa, “Fontes alternativas de energia,” 2022, [Online; accessed 2-May-2022]. [Online]. Available: https://brasilescola.uol.com.br/geografia/fontes-alternativas-energia.htm

J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, Control of power converters in ac microgrids, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 11, pp. 47344749, 2012

CÓDIGO: ET1678

AUTOR: LARISSA SOARES DE SOUZA

ORIENTADOR: LUIZ MARCOS GARCIA GONCALVES

TÍTULO: Robótica Livre e Desenvolvimento de Protótipos Educacionais para Escolas Municipais

Resumo

Este trabalho apresenta as atividades desenvolvidas durante o período de Iniciação Científica no Laboratório de Robótica Educacional da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LRE/UFRN), tendo como foco o desenvolvimento e a aplicação de protótipos de robótica educacional em diferentes contextos pedagógicos. Foram desenvolvidos dois projetos principais: o Semáforo do Toque, voltado à conscientização e prevenção da violência sexual infantil em associação à Campanha “Faça Bonito”, e o Giro-Bot, direcionado à educação ambiental por meio da demonstração do funcionamento de um rastreador solar. Os projetos foram ainda apresentados em eventos científicos e de divulgação, incluindo o ICAR 2025 e a 1ª Mostra de Robótica Educacional de Natal.

Palavras-chave: Robótica Educacional. Robótica Livre

TITLE: Open-Source Robotics and the Development of Educational Prototypes for Municipal Schools

Abstract

This paper presents the activities carried out during an undergraduate research period at the Educational Robotics Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Norte (LRE/UFRN), focusing on the development and application of educational robotics prototypes in various pedagogical contexts. Two main projects were developed: the "Semáforo do Toque" (Touch Traffic Light), aimed at raising awareness and preventing child sexual violence in conjunction with the "Faça Bonito" campaign; and the "Giro-Bot," designed for environmental education by demonstrating the operation of a solar tracker. These projects were also showcased at scientific and outreach events, including ICAR 2025 and the 1st Natal Educational Robotics Exhibition.

Keywords: Educational Robotics. Open Robotics.

Introdução

A Robótica Educacional (RE), enquanto área da Ciência, tem suas origens no final da década de 1960, quando o matemático e educador Seymour Papert, também precursor das pesquisas em inteligência artificial, iniciou pesquisas sobre o uso de computadores como ferramentas de aprendizagem. Nesse contexto, surgiu o ambiente de programação LOGO, criado pela equipe de Papert no Massachusetts Institute of Technology (MIT). O LOGO foi desenvolvido com o objetivo de possibilitar que crianças aprendessem conceitos matemáticos e computacionais por meio da experimentação e da construção de programas. Ainda hoje mantém-se esse ideal trazido por Papert nas atividades desenvolvidas atualmente com a RE contudo com mais ferramentas.

A partir dessa perspectiva, o Laboratório de Robótica Educacional (LRE) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) desenvolve e aprimora protótipos destinados a diferentes contextos educacionais. Entre essas iniciativas estão o Semáforo do Toque, desenvolvido como recurso pedagógico para ações de conscientização e prevenção da violência sexual infantil no contexto da Campanha "Faça Bonito. Proteja nossas Crianças e Adolescentes", e o Giro-Bot, protótipo baseado em Arduino voltado ao rastreamento solar e à abordagem de questões relacionadas à sustentabilidade e à conscientização ambiental.

Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Robótica Educacional da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LRE/UFRN), utilizando princípios de robótica educacional, cultura maker e desenvolvimento de protótipos com componentes acessíveis da Robótica Livre. As atividades foram organizadas nas etapas de estudo, planejamento, construção, programação, testes, aplicação e avaliação dos recursos desenvolvidos.

Para o desenvolvimento do Semáforo do Toque, inicialmente foram realizados estudos sobre robótica educacional, pensamento computacional e a Campanha "Faça Bonito". Em colaboração com a área de Educação, foi elaborado um plano de aula contendo objetivos, metodologia, materiais e atividades relacionadas à temática. O protótipo foi inicialmente desenvolvido e testado virtualmente no Tinkercad. Posteriormente, foi construído um modelo físico utilizando Arduino UNO, sensores de toque TTP223 e LEDs nas cores verde, amarelo e vermelho. Também foi desenvolvida uma versão virtual utilizando Scratch/PictoBlox, permitindo a utilização da proposta em situações nas quais não houvesse disponibilidade de equipamentos físicos.

Em complemento às atividades realizadas no ano anterior, foi realizado um levantamento bibliográfico na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), utilizando como descritores "violência sexual infantil", "educação", "robótica educacional" e "Maio Laranja". O levantamento teve como objetivo identificar pesquisas brasileiras que relacionassem a prevenção da violência sexual infantil a práticas pedagógicas e ao uso de tecnologias educacionais, contribuindo para a fundamentação teórica e o direcionamento das atividades desenvolvidas no projeto.

Já o Giro-Bot foi desenvolvido utilizando Arduino UNO, dois sensores LDR, um servomotor de 180° e materiais reutilizados para a construção da estrutura. O sistema realiza a comparação das leituras dos sensores e movimenta o servomotor em direção à região de maior intensidade luminosa. Antes da montagem física, o circuito foi testado no Tinkercad. Posteriormente, o protótipo foi utilizado em atividades educacionais, incluindo uma aplicação com crianças do NEI/UFRN que estudavam o girassol e sua relação com a luz. A atividade buscou relacionar o comportamento observado no girassol com o funcionamento do mecanismo automatizado, além de abordar conceitos de sustentabilidade e reutilização de materiais.

Resultados e Discussões

Em relação ao levantamento bibliográfico: os resultados indicaram a inexistência de trabalhos que relacionem diretamente a violência sexual infantil à robótica educacional ou, de forma mais ampla, à utilização da robótica como estratégia pedagógica para o enfrentamento de questões sociais. Quando utilizado apenas o descritor “violência sexual infantil”, foram retornados 44 obras distintas. Contudo, grande parte dessas produções concentra-se nas áreas do direito, da psicologia, da saúde e da educação, abordando aspectos judiciais, clínicos ou de políticas públicas.

A partir da análise sistemática dos títulos e resumos, foi possível identificar um número reduzido de 16 trabalhos com maior proximidade ao o escopo desta pesquisa, todos produzidos entre 2013 e 2025. Predominam dissertações de mestrado (14) sobre teses de doutorado (2). Dentre estes dezesseis trabalhos, são majoritariamente produções de instituições públicas como UNESP (5), UFAM (4) e UNIFESP (3).

Os projetos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa foram apresentados em eventos de divulgação científica. Entre essas atividades, destaca-se a participação na 1ª Mostra de Robótica Educacional de Natal, realizada no Centro Municipal de Referência em Educação Aluízio Alves (CEMURE), na qual foram apresentados projetos desenvolvidos pelos integrantes do LRE/UFRN.

O trabalho resultou no artigo Giro-Bot: Arduino-Powered Solar Tracker for Environmental Awareness in Educational Robotics, apresentado no ICAR 2025.

Conclusão

O desenvolvimento das atividades durante a Iniciação Científica demonstrou diferentes possibilidades de utilização da robótica educacional como estratégia interdisciplinar. A experiência permitiu acompanhar o processo desde a construção e programação dos protótipos até sua aplicação em ambientes educacionais. Contudo, apesar dos avanços alcançados, o trabalho ainda apresenta etapas importantes a serem desenvolvidas para melhores aplicações e enriquecimento da pesquisa.

Referências

L. S. de Souza et al., "Giro-Bot: Arduino-Powered Solar Tracker for Environmental Awareness in Educational Robotics," 2025 IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR), San Juan, Argentina, 2025, pp. 684-689, doi: 10.1109/ICAR65334.2025.11338732.

GitHub proposal repository. Available at: https://github.com/souzala/campanha-facabonito.

Anexos



I Mostra de Robótica Educacional de Natal

CÓDIGO: ET1690

AUTOR: JONATHAS LINHARES MACÊDO

ORIENTADOR: VICENTE ANGELO DE SOUSA JUNIOR

TÍTULO: Concepção de xApp para a Plataforma near-RT RIC da O-RAN visando divisão dinâmica de tráfego entre LTE/NR com Dual Connectivity

Resumo

Este trabalho investiga o uso de Aprendizado por Reforço para o gerenciamento de Conectividade Dupla com Múltiplas Tecnologias de Acesso de Rádio (MR-DC) em redes 5G. O cenário de turismo inteligente exige suporte simultâneo a aplicações de Realidade Estendida (XR), que demandam baixíssima latência (URLLC), e ao tráfego contínuo de Banda Larga Móvel (eMBB). A configuração estática do fatiamento de rede prova-se ineficaz, gerando colapso de serviço sob altas demandas devido ao esgotamento de recursos. Para solucionar este gargalo, propõe-se um agente de Aprendizado por Reforço, baseado no modelo Multi-Armed Bandit (MAB), operando na camada PDCP para adaptar a alocação de tráfego de forma autônoma. Simulações conduzidas no software ns-3, empregando o módulo mmWave, demonstraram que o aprendizado por reforço garante 100% de satisfação no serviço eMBB enquanto libera o espectro 5G para maximizar a capacidade de usuários XR. O estudo evidencia o impacto prático da pesquisa universitária no avanço das telecomunicações, refletido no desenvolvimento local de algoritmos de ponta para a transição rumo às futuras redes móveis de sexta geração (6G).

Palavras-chave: 5G. MR-DC. Aprendizado por Reforço. Realidade Estendida. MAB.

TITLE: Dynamic Multi-RAT Dual Connectivity Control Based on Reinforcement Learning for Simultaneous eMBB and URLLC Services

Abstract

This work investigates the use of Reinforcement Learning for managing Multi-RAT Dual Connectivity (MR-DC) in 5G networks. The smart tourism scenario requires simultaneous support for Extended Reality (XR) applications, which demand ultra-low latency (URLLC), and continuous Enhanced Mobile Broadband (eMBB) traffic. Static network slicing configurations proved ineffective, leading to service collapse under high demands due to resource depletion. To solve this bottleneck, a Reinforcement Learning agent based on the Multi-Armed Bandit (MAB) model is proposed, operating at the PDCP layer to autonomously adapt traffic allocation. Simulations conducted in the ns-3

software using the mmWave module demonstrated that Reinforcement Learning guarantees 100% satisfaction for the eMBB service while freeing up the 5G spectrum to maximize XR user capacity. The study highlights the practical impact of university research in the advancement of telecommunications, reflected in the local development of cutting-edge algorithms for the transition towards future sixth-generation (6G) mobile networks.

Keywords: 5G. MR-DC. Reinforcement Learning. Extended Reality. MAB.

Introdução

O advento do ecossistema 5G e as projeções para as futuras redes 6G têm viabilizado o conceito de turismo inteligente, impulsionando a implementação de aplicações imersivas baseadas em Realidade Estendida (XR). Do ponto de vista da infraestrutura de telecomunicações, essa classe de aplicação impõe requisitos extremamente rigorosos de latência e largura de banda, enquadrando-se na categoria URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication). Contudo, o tráfego de um terminal móvel (UE) raramente é homogêneo. Em paralelo ao uso de aplicações imersivas, os usuários mantêm tráfego de fundo ininterrupto da categoria eMBB (Enhanced Mobile Broadband), como navegação pela Internet e consumo de redes sociais. A padronização do 3GPP desenvolveu a Conectividade Dupla Multi-RAT (MR-DC) para permitir que dispositivos mantenham conexões simultâneas com células 4G (LTE) e 5G (NR), viabilizando a divisão do tráfego (traffic splitting). Devido à suscetibilidade das bandas milimétricas (mmWave) a bloqueios arquitetônicos indoor, o uso de configurações estáticas e manuais para essa divisão de rede provou-se ineficiente, gerando degradação severa dos serviços sob flutuação de demanda. Para sanar a ineficiência das malhas abertas estáticas, este trabalho propõe a adoção do gerenciamento autônomo baseado em Aprendizado por Reforço, atuando diretamente no plano de usuário das estações rádio base. Além de sua relevância tecnológica, o desenvolvimento desta pesquisa reforça o papel da iniciação tecnológica na superação de gargalos críticos da infraestrutura de telecomunicações nacional. O objetivo central é demonstrar como o algoritmo garante a satisfação simultânea dos serviços URLLC e eMBB, convertendo a restrição de recursos em ganhos de capacidade.

Metodologia

A metodologia da pesquisa baseia-se em experimentação por simulação computacional sistêmica. Para emular a complexidade do ambiente de rádio, utilizou-se o Network Simulator 3 (ns-3) com a integração do módulo mmWave, permitindo a avaliação fim-a-fim da arquitetura MR-DC Opção 3 (onde o nó LTE atua como Mestre e ancora o plano de controle no EPC). O cenário foi modelado com base nas diretrizes Indoor Hotspot (TR 38.838) do 3GPP, reproduzindo um museu de 120x50 metros dentro de uma área total de 500x500 metros. A rede é composta por uma macrocélula 4G LTE outdoor operando em 2.12 GHz (largura de banda de 20 MHz, 1 antena transmissora) e uma small cell 5G NR indoor operando em 30 GHz (largura de banda de 100 MHz, arranjo de 64 antenas). O tráfego de dados simulado impõe estresse contínuo na rede via datagramas UDP em downlink: o serviço XR exige 30 Mbps com Packet Delay Budget (PDB) estrito de 15 ms, enquanto o eMBB opera com cargas de 2 a 8 Mbps e PDB

tolerante de 150 ms. A métrica de sucesso estipula que um usuário só é considerado satisfeito se receber 90% da taxa ofertada estritamente dentro do limite de tempo (PDB). A tomada de decisão autônoma foi modelada pelo framework Multi-Armed Bandit (MAB), operando periodicamente a cada 0,2 segundos na camada PDCP. O espaço de ações consiste em cinco porcentagens discretas de divisão de tráfego entre NR e LTE (ex: 100% LTE, 75% NR / 25% LTE, etc.). Para lidar com a dinamicidade da rede, o agente MAB descarta as médias amostrais tradicionais em favor de uma regra de Atualização Incremental (Q_nova = Q_antiga + alfa * [Recompensa - Q_antiga]). Nesta formulação, Q_nova representa a nova estimativa calculada para a qualidade daquela divisão de tráfego, Q_antiga é a estimativa anterior que o sistema possuía, e Recompensa é o valor real recém-obtido. O parâmetro de passo constante alfa dita a taxa de aprendizado do algoritmo, diluindo o peso de estados antigos da rede e conferindo rápida adaptação ao tráfego atual. A evolução do aprendizado é governada por uma função de recompensa hierárquica, que prioriza imperativamente a Qualidade de Serviço (QoS) e utiliza o throughput (vazão bruta em Mbps) exclusivamente como critério de desempate. O agente adota a política epsilon-greedy para balancear a exploração de novas configurações e a explotação da melhor divisão de rede conhecida.

Resultados e Discussões

A avaliação inicial estabeleceu o desempenho das abordagens estáticas como baseline. O simulador confirmou que os usuários outdoor (conectados puramente ao LTE) mantiveram 100% de satisfação independentemente das configurações internas (ver Anexos), isolando o problema da sobreposição XR e eMBB aos usuários indoor. Sob carga pesada de eMBB (8 Mbps), as malhas estáticas evidenciaram a falha do trade-off: rotear menos de 50% do tráfego para a rede NR destruiu o serviço eMBB, mas desviar a carga de fundo para o 5G canibalizou os recursos da aplicação imersiva, causando um colapso precipitado no número de usuários XR atendidos. A simulação dinâmica (transição de 8 Mbps para 2 Mbps no tráfego eMBB aos 20 segundos) colocou à prova o algoritmo do MAB. A estratégia de Aprendizado por Reforço extirpou a necessidade de parametrização manual, sustentando 100% de satisfação ininterrupta para os usuários eMBB, corrigindo o congestionamento autonomamente ao detectar as variações de tráfego (ver Anexos). O impacto mais expressivo ocorreu na maximização da capacidade URLLC (aplicação XR). O algoritmo identificou que a banda larga extrema do mmWave é essencial para suportar fluxos de 30 Mbps a 15 ms. Assim, o MAB microajustou o roteamento, descarregando ativamente os dados secundários (eMBB) na infraestrutura de backup 4G LTE apenas o suficiente para evitar a queda de qualidade, liberando todo o espectro 5G limpo para a Realidade Estendida (ver Anexos). O resultado matemático dessa otimização foi a sustentação de 100% de satisfação para até 12 usuários simultâneos no XR, superando o teto de 93% obtido pela melhor configuração estática (75% NR / 25% LTE) para a mesma carga. O ganho efetivo de suportar "um usuário extra" de altíssima exigência de banda comprova que a gestão dinâmica via software consegue extrair incrementos profundos de capacidade espectral, postergando o esgotamento dos recursos de rádio sem a implantação de novas antenas físicas. Todos os algoritmos falharam no 13º usuário, validando que o limite atingido foi físico (limitação do canal), e não uma imperfeição analítica do algoritmo.

Conclusão

A pesquisa atesta a viabilidade e a superioridade do Aprendizado por Reforço, especificamente do método Multi-Armed Bandit, para a orquestração em tempo real de redes móveis densas. O modelo superou o engessamento arquitetônico tradicional do 5G, convertendo o conflito histórico entre pacotes URLLC e eMBB em complementaridade, viabilizando o conceito de Zero-touch Network Management. A utilização da iniciação tecnológica e da experimentação computacional provou ser capaz de oferecer soluções reais de economia de infraestrutura, extraindo capacidade máxima das antenas disponíveis através do roteamento inteligente de dados. A continuidade do projeto prevê a expansão da técnica para ambientes Open RAN multicélulas e uso de matrizes de ação contínuas.

Referências

[1] L. Medeiros, T. Guerra, D. Luna, A. Campos, F. Abinader, D. Rosário, A. Neto, and V. Sousa, "RL-Based multi-RAT Dual Connectivity Control for Consistent User-Satisfied Multiservices Connectivity," IEEE ISCC, 2026. [2] 3GPP, "Extended Reality (XR) in 5G (Release 17)," Std., 2022. [3] R. Sutton and A. Barto, Reinforcement Learning: An Introduction, 2018. [4] L. Vignaroli et al., "The Touristic Sector in the 5G Technology Era: The 5G-TOURS Project Approach," in 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2020, pp. 1-6. [5] M. Mezzavilla et al., "End-to-End Simulation of 5G mmWave Networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 3, pp. 2237-2263, 2018.

Anexos



Figura 1 - Satisfação dos usuários outdoor para a aplicação tipo eMBB (Valores fixos de MR-DC).



Figura 2 - Satisfação dos usuários indoor para a aplicação tipo eMBB (Comparação de estratégias dinâmicas e estáticas).



Figura 3 - Satisfação dos usuários indoor para a aplicação XR (Comparação de estratégias evidenciando o ganho de capacidade do MAB).

CÓDIGO: ET1698

AUTOR: MESAQUE SUYAN DE OLIVEIRA PINHEIRO

ORIENTADOR: JOSE HERIBERTO OLIVEIRA DO NASCIMENTO

TÍTULO: Produção de Célula Solar de alta eficiência energética obtida com Perovskita, materiais 2D e pontos quânticos.

Resumo

A demanda crescente por fontes de energia renováveis tem incentivado o desenvolvimento de novas tecnologias fotovoltaicas, entre as quais se destacam as células solares de perovskita devido ao seu potencial de alta eficiência, possibilidade de fabricação em filmes finos e versatilidade de composição. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo inicial sintetizar a perovskita de brometo de chumbo e césio ($CsPbBr_3$), visando à obtenção de um material com potencial para aplicação em dispositivos fotovoltaicos. A síntese foi realizada utilizando dimetilformamida (DMF) como solvente e $PbBr_2$ e CsBr como precursores, com a utilização de ácido oleico e oleilamina como agentes auxiliares. Após a preparação da solução precursora, o material foi adicionado ao tolueno, submetido à centrifugação e posteriormente seco em estufa. A formação do material foi avaliada por meio de observações visuais e imagens obtidas sob radiação ultravioleta, nas quais foi observada fluorescência característica do produto sintetizado. Os resultados indicaram que a metodologia empregada possibilitou a obtenção do $CsPbBr_3$ em um intervalo de tempo relativamente curto e com procedimento experimental simples. Dessa forma, a rota de síntese utilizada apresenta potencial para a produção do material e para sua aplicação em etapas posteriores.

Palavras-chave: Célula Solar. Perovskita. Materiais 2D. fotovoltaico. energia solar

TITLE: Production of high energy efficiency Solar Cell obtained with Perovskite, 2D materials and quantum dots.

Abstract

The growing demand for renewable energy sources has encouraged the development of new photovoltaic technologies, among which perovskite solar cells stand out due to their potential for high efficiency, the possibility of thin-film fabrication, and composition versatility. In this context, the initial aim of this work was to synthesize cesium lead bromide perovskite ($CsPbBr_3$), aiming to obtain a material with potential for use in photovoltaic devices. The synthesis was carried out using dimethylformamide (DMF) as a solvent and $PbBr_2$ and CsBr as precursors, with oleic acid and oleylamine used as

auxiliary agents. After preparing the precursor solution, the material was added to toluene, centrifuged, and then dried in an oven. The formation of the material was evaluated through visual observations and images taken under ultraviolet radiation, where the characteristic fluorescence of the synthesized product was observed. The results indicated that the method used allowed the $CsPbBr_3$ to be obtained in a relatively short time and with a simple experimental procedure. In this way, the synthesis route used shows potential for producing the material and for its application in later stages.

Keywords: Solar Cell. Perovskite. 2D Materials. Photovoltaic. Solar Energy.

Introdução

Atualmente, a produção de energia solar tem crescido como uma das principais fontes energéticas renováveis e sustentáveis para o futuro, estando em 2º lugar como maior fonte energética do país, superando a energia eólica (REVISTA MINERAÇÃO, 2023). Tornando-se uma opção mais limpa e abundante em comparação aos combustíveis fósseis, como carvão e diesel. Essa mudança é um marco positivo para os objetivos de desenvolvimento sustentável, criados pela ONU em 2016, em especial a ODS 7, que busca assegurar o acesso à energia acessível, confiável, sustentável e moderna, e a ODS 9, que incentiva a inovação e o desenvolvimento de tecnologias e infraestruturas mais sustentáveis.

Neste contexto, a busca por uma maneira mais barata e eficiente de se produzir células solares foi impulsionada, dando início às placas solares de 2ª e 3ª geração, visando principalmente tornar o custo de produção mais baixo e substituir o uso do silício na produção do material, respectivamente. Esta nova fase de células emergentes possui como base de materiais orgânicos, corantes, pontos quânticos ou perovskitas, e também englobam estruturas mais complexas, como as células tandem (ou multi-junção), células de portadores quentes e tecnologias de upconversion (RAPHAEL et al., 2018). Até o atual cenário, as células solares de perovskita são as que apresentam características mais promissoras para o desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos de alta eficiência. Uma das aplicações mais propícias a alcançar melhores resultados é composta da união da perovskita com silício, as células tandem, mencionadas anteriormente. As células de perovskita são chamadas de células de filme fino porque requerem camadas ativas muito mais finas em comparação com as células fotovoltaicas de silício cristalino, a tecnologia predominante no mercado de células solares (UNITED STATES, 2024, par. 3). A vantagem das perovskitas está na sua alta eficiência, possibilidade de fabricação em filmes finos e versatilidade de materiais, já que o termo perovskita refere-se a uma classe de materiais caracterizada por uma estrutura cristalina específica, cuja composição pode ser genericamente descrita pela fórmula ABX_3 (WANG et al., 2016), em que a posição A contém um cátion orgânico, B é um cátion metálico e X é um ânion haleto. Por outro lado, sua estabilidade a longo prazo e durabilidade são pontos que ainda estão sendo melhorados e estudados nas pesquisas mais recentes, pois sua suscetibilidade à decomposição quando em contato com umidade se torna um grande desafio, já que necessita de certa estabilidade climática para que seja aproveitada ao máximo, uma vez que a penetração de umidade pode acelerar a degradação do material, comprometendo a estabilidade e a vida útil dos dispositivos fotovoltaicos (WANG et al., 2016). Diante disso, este trabalho tem como finalidade inicial a síntese de perovskita $CsPbBr_3$ por meio de uma metodologia de preparação relativamente simples e de baixo custo, visando à obtenção do material para posterior aplicação no desenvolvimento de

dispositivos fotovoltaicos. A formação do material é avaliada inicialmente por meio de suas características ópticas e visuais, estabelecendo uma base experimental para as etapas subsequentes de fabricação, caracterização e avaliação de células solares de perovskita.

Metodologia

Tendo previamente colocado para agitar 5 mL de Dimetilformamida (DMF), foram pesados 0,0734 g de Brometo de Chumbo (PbBr2), assim como 0,0426 g do Brometo de Césio (CsBr), utilizando como precursores base para a síntese do CsPbBr3. Adicionou-se o PbBr2 e, logo após, o CsBr. Manteve-se em agitação até a dissolução completa.

Após confirmação visual, foram adicionados 0,50 mL de ácido oleico (OA), observando-se uma coloração laranja na solução. Então, após adicionar 0,25 mL de oleilamina (OAm) a mistura apresentou certa coagulação. Depois de alguns instantes, foram colocados em um béquer 10 mL de tolueno sob agitação e adicionados 0,1 mL da solução preparada a esse béquer que continha o tolueno rapidamente, apresentando uma cor esverdeada característica da formação da perovskita.

Centrifugando a 4.000 rpm por 20 minutos, foi retirado o sobrenadante e posto para secar em estufa por 2 horas a 40°C, resultando em um pó verde fluorescente, confirmando a formação de perovskita prevista.

Resultados e Discussões

As imagens da Figura 1 e Figura 2, obtidas com radiação ultravioleta, evidenciam a formação do material sintetizado, apresentando características visuais compatíveis com os estudos do produto esperado. Esses resultados demonstram que o método empregado foi capaz de produzir o material em um intervalo de tempo relativamente curto, destacando-se também pela simplicidade de execução. Na Figura 3 podemos observar picos característicos em 300 e 350 nm, o que corrobora para essa afirmação. A possibilidade de obtenção do material em poucas horas mostra um aspecto relevante para a continuidade do processo experimental, permitindo otimizar as etapas subsequentes de fabricação.

Conclusão

A partir dos procedimentos experimentais realizados, foi possível obter o material $CsPbBr_3$ por meio de uma rota de síntese relativamente simples e de curta duração. A formação do material foi evidenciada pelas características visuais observadas durante o processo e, principalmente, pela fluorescência apresentada pelo produto final quando submetido à radiação ultravioleta, conforme apresentado nas Figuras 1 e 2.

Os resultados obtidos indicam que o método empregado apresentou-se satisfatório para a obtenção da perovskita, demonstrando potencial para a continuidade das etapas propostas neste estudo. O baixo tempo de processamento e a relativa simplicidade dos procedimentos utilizados são aspectos relevantes para o desenvolvimento de uma metodologia acessível e com potencial de aplicação na fabricação de dispositivos fotovoltaicos. Entretanto, embora as evidências ópticas obtidas sejam compatíveis com a formação da perovskita, são necessárias caracterizações complementares para confirmar exatamente sua estrutura, composição, morfologia e propriedades ópticas. Técnicas como difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica e espectroscopia de fotoluminescência serão utilizadas para detalhar o material sintetizado futuramente.

Dessa forma, o presente trabalho constitui uma etapa inicial para o desenvolvimento de células solares de perovskita, fornecendo uma rota experimental para a obtenção do $CsPbBr_3$, tornando viável sua utilização na obtenção das células solares flexíveis posteriormente.

Referências

REVISTA MINERAÇÃO. Energia solar supera eólica e se torna a 2ª maior fonte brasileira, diz Absolar. Revista Mineração, 4 jan. 2023. Disponível em: https://revistamineracao.com.br/2023/01/04/energia-solar-supera-eolica-e-se-torna-2a-maior-fonte-brasileira-diz-absolar/. Acesso em: 27 ago. 2026.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Nações Unidas no Brasil, 2026. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 30 ago. 2026.

UNITED STATES.Department of Energy. Perovskite solar cells. U.S. Department of Energy, 2024. Disponível em: https://www.energy.gov/cmei/systems/perovskite-solar-cells. Acesso em: 27 ago. 2026.

RAPHAEL, Ellen; SILVA, Mariana Nascimento; SZOSTAK, Rodrigo; SCHIAVON, Marco Antônio; NOGUEIRA, Ana Flávia. Células solares de perovskitas: uma nova tecnologia emergente. Química Nova, São Paulo, v. 41, n. 1, p. 61-74, 2018. DOI: https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170127

WANG, D.; WRIGHT, M.; ELUMALAI, N. K.; UDDIN, A. Stability of perovskite solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 147, p. 255–275, 2016. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.12.025.

XU, Guoqing; ZANG, Shuoshuo; LIU, Hewen. Tailoring molecular dimensions of cesium lead bromide perovskites with varying compositions of oleic acid and oleylamine. Advanced Optical Materials, v. 11, n. 13, p. 2300064, 2023. DOI: 10.1002/adom.202300064.

Anexos



Figura 1 - Solução de perovskita pré-secagem.



Figura 2 - Pó de perovskita pós-secagem.



Figura 3 - FTIR CsPbBr3

CÓDIGO: ET1704

AUTOR: SOFIA LELLIS CAVALCANTI MARANHÃO

ORIENTADOR: ANTONIO EDUARDO MARTINELLI

TÍTULO: Impressão 3D de compósitos cimentícios com baixo consumo de cimento Portland

Resumo

Cada vez mais a técnica de impressão 3D ganha espaço e aplicação no meio da construção civil. Como forma econômica e sustentável, ela favorece na redução de custos para o meio e pode ser uma grande aliada na produção de compósitos com baixo nível de cimento e, consequentemente, com baixa emissão de carbono. Nessa perspectiva, o objetivo desta pesquisa é avaliar a influência da substituição de um alto teor de cimento que compõe a argamassa por um material pozolânico, neste caso, o metacaulim, somado ao hidróxido de cálcio (cal hidratada) que atuará como enriquecedor dessa mistura gerando um C-S-H secundário. A função dessa nova reação é repor a portlandita, reduzida a partir do momento em que o cimento for substituído, e proporcionar propriedades mecânicas e microestruturais de igual ou melhor desempenho às resultantes de uma produção de argamassa comum, com o aglomerante tradicional. Para realização do estudo foram desenvolvidos dois grupos de argamassas, diferenciados pela relação entre aglomerante e areia, sendo um grupo no traço 1:2 e outro no traço 1:1. Para cada grupo foram consideradas três argamassas: uma de referência, sem nenhum tipo de adição ou substituição, uma segunda com substituição de 50% da massa de cimento por pozolana e uma terceira com substituição de 45% da massa de cimento por pozolana e 5% de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$).

Palavras-chave: Impressão 3D. Baixo carbono. Cimento Portland. Descarbonização.

TITLE: 3D Printing of Cementitious Composites with Low Portland Cement Content.

Abstract

The 3D printing technique is increasingly gaining ground and application in civil construction. As an economical and sustainable way, it helps reduce costs for the

environment and can be a great ally in the production of composites with a low level of cement and, consequently, with low carbon emissions. From this perspective, the objective of this research is to evaluate the influence of replacing a high cement content that makes up the mortar with a pozzolanic material, in this case, Metakaolin, added to calcium hydroxide (hydrated lime) which will act as an enricher for this mixture, generating a secondary C-S-H. The function of this new reaction is to replace the portlandite, reduced from the moment the cement is replaced, and provide mechanical and microstructural properties of equal or better performance to those resulting from the production of common mortar, with the traditional binder. To carry out the study, two groups of mortars were developed, differentiated by the binder-to-sand ratio, one with a 1:2 ratio and another with a 1:1 ratio. For each group, three mortars were considered: a reference mixture, without any type of addition or substitution, a second with replacement of 50% of the cement mass by pozzolan, and a third with replacement of 45% of the cement mass by pozzolan and 5% of calcium hydroxide ($Ca(OH)_2$). The compositions with a 1:1 ratio received greater emphasis throughout the study, considering their application in the 3D printing process. For each m

Keywords: 3D printing. Low carbon. Portland cement. Decarbonization.

Introdução

1. INTRODUÇÃO

A partir do avanço crescente das mudanças climáticas no planeta, como alerta para a intensidade do estilo de vida humano, as preocupações voltadas para o meio ambiente começaram a ter maior notoriedade. Diante dos, também avançados, processos de urbanização e industrialização, a tecnologia surge como alternativa eficaz na maneira de pensar e realizar uma nova construção civil. A manufatura aditiva, como técnica moderna, está dentro dessas novas mudanças, ganhando força e chamando a atenção na área industrial da construção civil nos últimos anos. O baixo custo em mão de obra, bem como uma menor geração de resíduos quando comparada com operações tradicionais, tais como moldagem em obra e pré-moldagem, são algumas de suas vantagens de alta eficiência (Zhang, Jingchuan et al., 2019).

Um dos exemplos de manufatura aditiva é a impressão de concreto em 3D (3DCP). Tal processo é caracterizado pela fabricação automatizada de formas livres, camada por camada, fazendo uso de materiais cimentícios (Alchaar; Al-Tamimi, 2021). Outra vantagem apresentada por essa técnica é a possibilidade de construir sem fôrmas, proporcionando benefícios quando se trata de taxa de produção, liberdade arquitetônica e redução de custos (Perrot; Rangeard; Pierre, 2016), aliada ao propósito da impressão 3D também está a produção de argamassas com baixo teor de cimento, visto que esse material é um dos principais responsáveis por grande parte da emissão de CO2 na atmosfera. De acordo com a ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland (2023), a produção de cimento responde, mundialmente, por cerca de 7% de todo o gás carbônico emitido pela humanidade. Mas o Brasil já vem reduzindo sua participação nessa porcentagem a quase um terço da média mundial (2,3%), segundo o último Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa.

O uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) surge como fonte de substituição do cimento Portland comum por um material pozolânico que cumpra funções parecidas, ou até mesmo mais eficazes, sem perder a essência, as propriedades reológicas e a função original do compósito em questão, com baixo impacto ambiental.

Nessa perspectiva, foi escolhido um MCS obtido da calcinação do argilomineral Caulinita, ou seja, o metacaulim, como substituinte de baixo impacto ambiental de cimento Portland. A pesquisa busca estudar os impactos provocados pela substituição parcial de cimento por metacaulim e cal hidratada nas propriedades mecânicas e microestruturais de argamassas para impressão 3D com baixo teor de carbono.

Metodologia

O estudo foi desenvolvido a partir da produção e avaliação de dois grupos de argamassas, diferenciados pela relação aglomerante:areia, sendo utilizadas as proporções 1:2 e 1:1. Em cada grupo foram avaliadas três composições: T01, utilizada como referência e composta por cimento, areia e água; T02, com substituição de 50% da massa de cimento por Metacaulim; e T03, com substituição de 45% da massa de cimento por Metacaulim e 5% por hidróxido de cálcio. As misturas também receberam HPMC e superplastificante para adequação das propriedades no estado fresco.

A preparação das argamassas foi realizada em misturador mecânico, seguindo uma sequência de incorporação e homogeneização dos materiais. Após o preparo, as propriedades no estado fresco foram avaliadas por meio do ensaio de índice de consistência em flow-table, seguindo os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2016). Para análise da trabalhabilidade das composições destinadas à extrusão, adotou-se como referência a faixa de espalhamento entre 200 e 260 mm, compatível com estudos anteriormente realizados no equipamento de impressão 3D utilizado.

Para avaliação das propriedades no estado endurecido, foram confeccionados corpos de prova prismáticos com dimensões de 4 cm × 4 cm × 16 cm. Para as composições com relação aglomerante:areia 1:2, foram produzidos corpos de prova por moldagem convencional e avaliados aos 7 e 28 dias. Para as composições 1:1, foram avaliados corpos de prova moldados convencionalmente e corpos de prova conformados por extrusão manual em camadas, aos 7 dias. Na extrusão manual, a argamassa foi depositada em cordões contínuos no interior dos moldes, sem aplicação de golpes ou vibração para adensamento, buscando reproduzir de forma preliminar a conformação do material por deposição em camadas.

Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos submersos em tanque com água e cal até as respectivas idades de ensaio. Posteriormente, foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, permitindo comparar o desempenho mecânico das diferentes composições e, para as argamassas 1:1, analisar também a influência da forma de conformação. A adequação das misturas ao processo de extrusão foi ainda avaliada considerando seu comportamento no estado fresco e os testes realizados com o sistema de impressão 3D.

1. RESULTADOS E DISCUSSÕES

1.1 Resistência à tração na flexão e à compressão

1.1.1 Resistência à tração na flexão

A figura 8 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão nas idades de 7 e 28 dias, respectivamente.

Figura 8 - Resistência à tração na flexão nas idades de 7 e 28 dias

Fonte: Autoria Própria (2026)

O traço de referência, aos 7 dias, alcançou uma resistência à tração acima de 7MPa, satisfatória diante da NBR 61818 (ABNT, 2023), e tanto o traço 2 como o traço 3, acompanharam essa resistência variando apenas 10% e 12% para menos.

De 7 para 28 dias houve um ganho, especialmente no T01 e T02, de cerca de 12%. Apesar de apresentar uma melhora, o efeito pozolânico não se revelou de forma tão expressiva. De maneira análoga, o T03 aumentou por volta de 4% somente, indicando uma certa estagnação no ganho de resistência.

Embora com poucas alterações, os resultados dos ensaios de tração na flexão comprovam a boa resistência das argamassas em questão, diante dos altos índices de substituição do cimento, quando comparadas com os traços de referência.

O traço de referência, aos 7 dias, alcançou uma resistência média à tração na flexão de aproximadamente 6,64 MPa para os corpos de prova moldados convencionalmente (T01N). Os traços T02N e T03N acompanharam essa resistência, apresentando valores médios de 4,73 MPa e 5,98 MPa, respectivamente, correspondendo a reduções de aproximadamente 29% e 10% em relação ao traço de referência.

Para os corpos de prova produzidos por extrusão manual, o traço de referência (T01B) apresentou resistência de 6,21 MPa. O T02B alcançou 4,84 MPa, cerca de 22% abaixo da referência, enquanto o T03B apresentou 5,70 MPa, com uma redução de aproximadamente 8%.

Embora com algumas variações, os resultados dos ensaios de tração na flexão demonstram que os traços com substituição acompanharam a resistência das respectivas argamassas de referência. Entre eles, o T03 apresentou os melhores resultados, tanto para a moldagem convencional quanto para a extrusão manual, aproximando-se mais dos valores obtidos pelos traços de referência.

Resistência à compressão: A figura 9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias, respectivamente.

Figura 9 - Resistência à compressão das argamassas com relação aglomerante:areia 1:1, aos 7 dias

Fonte: Autoria Própria (2026)

Semelhante ao da análise anterior, aos 7 dias, ambos os traços T02 e T03 obtiveram uma queda de quase 30% da resistência, quando comparados ao traço de referência. Tal acontecimento é esperado, visto que, a reação pozolânica está diretamente ligada a presença do hidróxido de cálcio na hidratação do cimento e, uma vez que, metade do valor referencial deste aglomerante foi substituido por metacaulim, a consequência será uma resistência inicial menor.

Ao observar a evolução das idades de 7 para 28 dias, o traço que apresentou um maior destaque foi o T02 (50% cimento e 50% metacaulim), com mais de 35% de ganho de resistência, colocando em questão a atividade pozolânica do metacaulim que se favoreceu do tempo maior de cura e intensificou o resultado. O T03 alcançou pouco mais de 20% nessa quarta semana, percentual ainda baixo diante do esperado para a reação da pozolana com a cal. Por último, o traço de referência subiu quase 3%, provando um alcance de potencial máximo já aos 7 dias e, posteriormente, apenas uma manutenção de resistência.

Figura 10 - Resistência à compressão na idade de 7 dias:

Fonte: Autoria Própria (2026)

Para facilitar a identificação dos corpos de prova no gráfico, adotou-se a letra N para aqueles produzidos por moldagem convencional e a letra B para os produzidos por extrusão manual com bisnaga.

Seguindo um raciocínio semelhante ao da análise anterior, aos 7 dias, os traços T02N e T03N obtiveram uma queda de aproximadamente 28% e 25% da resistência, respectivamente, quando comparados ao traço de referência T01N, que alcançou 48,75 MPa. Tal acontecimento é esperado, visto que metade do valor referencial do cimento foi substituída por Metacaulim, resultando em uma resistência inicial menor.

Para os corpos de prova produzidos por extrusão manual, o traço de referência T01B apresentou resistência de 35,56 MPa. O T02B alcançou 31,84 MPa, apresentando uma redução de cerca de 10% em relação à referência. Já o T03Bapresentou 36,50 MPa, valor aproximadamente 3% superior ao T01B.

Ao comparar as duas formas de moldagem, o T02 apresentou uma redução de aproximadamente 9% nos corpos de prova extrudados, enquanto o T03 apresentou valores praticamente semelhantes, sendo 36,40 MPa para o T03N e 36,50 MPapara o T03B. Dessa forma, o T03 apresentou o melhor desempenho entre os traços com substituição do cimento, principalmente quando considerada a manutenção da resistência entre os diferentes métodos de conformação.

Conclusão

Este estudo avaliou o desenvolvimento de compósitos cimentícios com elevado teor de substituição do cimento Portland, buscando conciliar a redução do consumo de cimento com propriedades adequadas ao processo de impressão 3D. Foram analisadas argamassas com relações aglomerante:areia de 1:2 e 1:1, permitindo compreender tanto o comportamento mecânico das composições quanto sua adequação às condições de extrusão do equipamento utilizado.
As argamassas com relação aglomerante:areia 1:2 apresentaram resultados satisfatórios de resistência mecânica, mesmo com a substituição de até 50% da massa de cimento Portland por Metacaulim e pela combinação de Metacaulim e hidróxido de cálcio. Entretanto, nas condições avaliadas, essa proporção não apresentou comportamento adequado para a extrusão no equipamento utilizado, demonstrando que uma boa resistência no estado endurecido, isoladamente, não garante a aplicabilidade do material no processo de impressão 3D.A redução da proporção de areia, adotando-se a relação aglomerante:areia 1:1, proporcionou misturas mais compatíveis com as características de extrusão estudadas. Os resultados de espalhamento permaneceram dentro da faixa de 200 a 260 mm adotada como referência para o equipamento, e o traço de referência apresentou comportamento satisfatório no teste preliminar de extrusão realizado na impressora.
Os resultados de resistência mecânica das argamassas 1:1 demonstraram que a elevada substituição do cimento reduziu a resistência em relação ao traço de referência, principalmente nos corpos de prova moldados convencionalmente. Ainda assim, os valores obtidos demonstram que foi possível substituir 50% do cimento Portland mantendo resistências mecânicas consideráveis, com destaque para o T03, composto por 50% de cimento, 45% de Metacaulim e 5% de hidróxido de cálcio, que apresentou o melhor desempenho entre os traços com substituição.

A comparação entre os corpos de prova moldados convencionalmente e aqueles produzidos por extrusão manual em camadas mostrou que o processo de conformação não provocou, necessariamente, grandes perdas de resistência. Esse comportamento foi especialmente evidente no T03, que apresentou valores muito próximos de resistência à compressão entre a moldagem convencional e a extrusão, além de pequena variação na resistência à tração na flexão. Esses resultados indicam um comportamento promissor da composição diante da conformação em camadas.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram o potencial da utilização de argamassas com baixo consumo de cimento Portland na impressão 3D, principalmente para as composições com relação aglomerante:areia 1:1. A associação entre a redução do teor de cimento, a manutenção de propriedades mecânicas satisfatórias e o comportamento apresentado durante a extrusão aponta para a possibilidade de desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e adequados às novas tecnologias construtivas.

Como continuidade do estudo, recomenda-se a realização de novos te

Referências

1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Cimento Portland: determinação da composição granulométrica. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo -

Determinação da massa específica e massa específica aparente. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e o do índice de vazios. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: Cimento Portland -

Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 3: determinação da finura por meio da peneira 45 µm. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9289: Cal hidratada para argamassas Determinação da finura. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento

de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto resistidos Determinação da captação de água por amostragem - Índice de vazios e massa específica. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2005.

ARAÚJO, Rísia Amaral. Avaliação de misturas cimentícias para impressão 3D com desempenho térmico otimizado. Orientador: Antônio Eduardo Martinelli. 2022. 125f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

CHEAH, Chee Ban; LIEW, Jia Jia; KHAW, Kevin Le Ping; AKIL, Hazizan Bin Md; ALENGARAM, Ubagaram Johnson. Calcined clay as a low-carbon cementitious material: comprehensive review of treatment method, properties, and performance in concrete. Cleaner Waste Systems, [S.L.], v. 11, p. 100323, jun. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100323.

CHEN, Yu et al. 3D printing of calcined clay-limestone-based cementitious materials. Cement and Concrete Research, [s. l.], v. 149, 2021.

DE SCHUTTER, Geert et al. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018.

FERNANDEZ, Rodrigo; MARTIRENA, Fernando; SCRIVENER, Karen L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. Cement and Concrete Research, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 113–122, 2011.

GÓIS, Elder Santos de. Análise de argamassa de assentamento com incorporação de resíduos de placas de circuito impresso (PCI). 2016. 15 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016;

GUIMARÃES, José Epitácio Passos; GOMES, Rubens Donizeti; SEABRA, Mauro Adamo. GUIA DAS ARGAMASSAS NAS CONSTRUÇÕES: Construindo para sempre com Cal Hidratada. 8. ed. Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 2004.

JINDAL, Bharat Bhushan; JANGRA, Parveen. 3D Printed Concrete: a comprehensive review of raw materials properties, synthesis, performance, and potential field applications. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 387, p. 131614, jul. 2023. Elsevier BV.

http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131614.

KATZER, J.; SZATKIEWICZ, T. Properties of concrete elements with 3-D printed formworks which substitute steel reinforcement. Construction and Building Materials, [s. l.], v. 210, p. 157–161, 2019.

PERROT, A.; RANGEARD, D.; PIERRE, A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, [s. l.], v. 49, n.

4, p. 1213–1220, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0.

PINTO, Bárbara Hillary de Almeida. Estudo de argamassas com adição de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde. 2018. 24 f. Artigo Científico - Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

MEDDAH, Mohammed Seddik; OWAISI, Munira Al; ABEDI, Mohammadmahdi; HAGO, Abdul Wahid. Mortar and concrete with lime-rich calcined clay pozzolana: a sustainable approach to enhancing performances and reducing carbon footprint. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 393, p. 132098, ago. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132098.

NUNES, Ueslei Silva. Análise da sinergia entre cimento, metacaulim e calcário na capacidade de impressão de argamassa LC3. Orientadora: Dra. Ana Cecilia Vieira da Nóbrega. 2024. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

SANJAYAN, J. G. et al. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete.

Construction and Building Materials, [s. l.], v. 172, p. 468–475, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232.

SILVA, Kleber Roberto Matos da; FERNANDEZ, Oscar Jesus Choque; CUNHA, Rodrigo Rodrigues da; PICANÇO, Marcelo de Souza. Propriedades mecânicas de argamassas sustentáveis, utilizando resíduos de celulose, cinza volante e lama de cal, da Amazônia, em substituição parcial do clínquer. Caderno Pedagógico, [S.L.], v. 21, n. 7, p. 5904, 19 jul. 2024. South Florida Publishing LLC.

SNELLINGS, Ruben et al. RILEM TC 238-SCM: interlaboratory study on quantification of supplementary cementitious materials in blended cements by X-ray diffraction. Materials and Structures, Paris, v. 51, n. 6, p. 1-18, 2018.

ZHANG, Jingchuan et al. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, [s. l.], v. 125, p. 105533, 2019.

ZHANG, Yu et al. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. Construction and Building Materials, [s. l.], v. 201, p. 278–285, 2019.

ZUNINO, Franco; MARTIRENA, Fernando; SCRIVENER, Karen. Limestone calcined clay cements (lc3). ACI Materials Journal, [s. l.], v. 118, n. 3, p. 49–60, 2021.

ZUNINO, Franco; SCRIVENER, Karen. The reaction between metakaolin and limestone and its effect in porosity refinement and mechanical properties. Cement and Concrete Research, [s. l.], v. 140, 2021.

Anexos



Tabela 1



Tabela 3



Figura 1



Figura 2



Figura 4



Figura 5



Figura 3



Figura 6



Figura 7



Figura 8



Figura 9



Figura 10



Tabela 4



Tabela 5



Tabela 2

CÓDIGO: ET1706

AUTOR: FERNANDO GABRIEL ARAUJO GUIMARAES

ORIENTADOR: MARCELO AUGUSTO COSTA FERNANDES

TÍTULO: Predição de Demanda em Ambientes Kubernetes com Aprendizado de Máquina

Resumo

Em ambientes de computação em nuvem orquestrados por Kubernetes, a variabilidade na carga de trabalho das aplicações exige estratégias de escalonamento mais ágeis do que os métodos reativos tradicionais, baseados em limiares fixos. Este trabalho tem como objetivo desenvolver modelos preditivos baseados em aprendizado de máquina supervisionado para estimar, com antecedência, a demanda por CPU, memória e rede em aplicações executadas em um cluster Kubernetes, apoiando decisões proativas de escalonamento horizontal no âmbito do ProjetoPesquisa PVG21389-2023. A metodologia envolveu a implementação e validação de um ambiente de monitoramento real (Prometheus e cAdvisor sobre um cluster Kubernetes local) e o treinamento dos modelos sobre o dataset público Alibaba Cluster Trace 2018, cuja escala reflete meses de operação real de um cluster de produção, histórico que uma instrumentação local recém-implantada não possui. Foram comparados cinco algoritmos: Regressão Linear, Árvore de Decisão, Random Forest, XGBoost e Perceptron Multicamadas (MLP), avaliados por MAE, RMSE e R^2. Os resultados mostraram desempenho robusto para memória e rede (R^2 próximo de 1,0), enquanto a predição de CPU manteve boa capacidade explicativa (R^2 acima de 0,87) com maior erro absoluto em cargas de trabalho voláteis. Conclui-se que os modelos preditivos são viáveis para apoiar o escalonamento proativo, com aplicação direta para a integração à lógica automatizada do projeto principal.

Palavras-chave: Kubernetes; Machine Learning; Escalonamento Horizontal

TITLE: Prediction of Resource Demand in Kubernetes Environments with Machine Learning

Abstract

In cloud computing environments orchestrated by Kubernetes, workload variability demands more agile scaling strategies than traditional reactive, threshold-based methods. This work aims to develop supervised machine learning predictive models to estimate, in advance, the demand for CPU, memory, and network resources in applications running on a Kubernetes cluster, supporting proactive horizontal scaling decisions within the scope of ProjetoPesquisa PVG21389-2023. The methodology

involved implementing and validating a real monitoring environment (Prometheus and cAdvisor on a local Kubernetes cluster) and training the models on the public Alibaba Cluster Trace 2018 dataset, whose scale reflects months of real production operation, a history that a newly deployed local instrumentation does not have. Five algorithms were compared: Linear Regression, Decision Tree, Random Forest, XGBoost, and Multilayer Perceptron (MLP), evaluated using MAE, RMSE, and R^2. Results showed robust performance for memory and network (R^2 close to 1.0), while CPU prediction maintained good explanatory power (R^2 above 0.87) with higher absolute error under volatile workloads. It is concluded that the predictive models are viable to support proactive scaling, with direct application to the integration into the main project's automated logic.

Keywords: Kubernetes; Machine Learning; Horizontal Scaling

Introdução

A computação em nuvem consolidou-se como o paradigma dominante para a implantação de aplicações modernas, e o Kubernetes tornou-se o padrão de fato para orquestração de contêineres em ambientes de produção. Nesses ambientes, a carga de trabalho das aplicações varia de forma contínua e, frequentemente, imprevisível, exigindo mecanismos de escalonamento capazes de ajustar dinamicamente a quantidade de réplicas de cada aplicação conforme a demanda real de recursos computacionais. O mecanismo nativo de escalonamento horizontal do Kubernetes, o Horizontal Pod Autoscaler, opera de forma reativa, ajustando o número de réplicas com base em métricas observadas no presente, geralmente por meio de limiares fixos. Essa abordagem tende a gerar períodos de sub ou sobreprovisionamento de recursos, impactando tanto a performance das aplicações quanto o custo da infraestrutura. Técnicas de aprendizado de máquina supervisionado surgem como uma alternativa promissora para antecipar essas variações, permitindo decisões de escalonamento proativas. Este trabalho está vinculado ao ProjetoPesquisa PVG21389-2023 (Escalonamento Horizontal de Aplicações em Cluster Kubernetes Baseado em Técnicas de Inteligência Artificial), cuja arquitetura de escalonamento inteligente depende de uma camada preditiva capaz de estimar, com antecedência, a demanda futura de recursos das aplicações. Diante desse cenário, define-se a seguinte problemática de pesquisa: de que forma modelos de aprendizado de máquina supervisionado podem ser treinados e comparados para estimar a demanda futura de CPU, memória e rede em aplicações executadas em um cluster Kubernetes, apoiando decisões proativas de escalonamento horizontal? O objetivo geral deste trabalho é desenvolver modelos preditivos baseados em aprendizado de máquina supervisionado para estimar, com antecedência, a demanda por CPU, memória e rede em aplicações executadas em clusters Kubernetes. Os objetivos específicos são: a) estudar os principais algoritmos de aprendizado de máquina supervisionado aplicáveis à predição de séries temporais; b) coletar e armazenar dados históricos de uso de recursos em um cluster Kubernetes instrumentado com Prometheus e cAdvisor; c) realizar o pré-processamento dos dados, incluindo limpeza, normalização, engenharia de atributos e segmentação temporal; d) treinar e comparar diferentes modelos preditivos, avaliando-os por meio de MAE, RMSE e R^2; e) avaliar a robustez e a generalização dos modelos em diferentes perfis de carga; e f) documentar o processo e os resultados obtidos, com vistas à integração futura dos modelos à lógica automatizada de escalonamento do projeto principal.

Metodologia

Ambiente de Monitoramento (Cluster Kubernetes) Como etapa de instrumentação prevista no plano de trabalho, foi implementado e validado um ambiente de monitoramento baseado em um cluster Kubernetes local (minikube, driver Docker), instrumentado com a stack kube-prometheus-stack (Prometheus, cAdvisor via kubelet e Grafana), instalada por meio de Helm. A coleta de métricas de CPU e memória por contêiner foi validada com dados reais, obtidos por consultas diretas ao Prometheus. Durante a validação, identificou-se uma limitação técnica na exposição de métricas de rede por contêiner pelo cAdvisor nesse ambiente específico. Tráfego de rede real foi gerado entre contêineres e confirmado no nível do sistema operacional do pod, porém não exposto pelas métricas container_network_* do Prometheus, mesmo após o aumento do volume de tráfego gerado. Essa limitação foi caracterizada como um problema técnico do ambiente, provavelmente relacionado ao isolamento de namespaces de rede sob o driver Docker em conjunto com o WSL2 no Windows, e não de volume ou tipo de tráfego. Adaptação de Escopo e Fonte de Dados para Treinamento A etapa de coleta e armazenamento de dados históricos de uso de recursos, prevista no cronograma de atividades, foi dedicada a duas frentes complementares: a implementação e validação do ambiente de monitoramento Kubernetes e a identificação, aquisição e preparação da fonte de dados utilizada para o treinamento dos modelos. Padrões sazonais e ciclos de carga representativos emergem da operação contínua de um sistema em produção já estabelecido ao longo de semanas ou meses, histórico que uma instrumentação recém-configurada não possui, independentemente do tempo dedicado à sua implantação e validação. Por essa razão, optou-se por um dataset público consolidado, amplamente utilizado na literatura: o Alibaba Cluster Trace 2018, especificamente sua tabela container_usage, que registra métricas reais de CPU, memória e rede por contêiner, coletadas em um cluster de produção ao longo de oito dias completos. Dessa forma, a etapa de coleta resultou em dois entregáveis complementares: o ambiente de monitoramento local, que cumpre a etapa de instrumentação prevista no plano de trabalho, e o dataset público preparado para treinamento, cujo volume e variabilidade temporal refletem meses de operação de um cluster de produção real. Amostragem da Base de Dados A tabela original container_usage.csv possui aproximadamente 28 GB compactados e mais de 4 bilhões de linhas, volume que inviabiliza o processamento integral em um ambiente de pesquisa individual. Foi então realizada uma amostragem estratificada por contêiner: identificaram-se 67.438 contêineres únicos na base completa, dos quais 300 foram selecionados aleatoriamente (semente fixa, garantindo reprodutibilidade), mantendo-se o histórico completo dos oito dias de cada contêiner selecionado, o que preserva a sazonalidade diária e semanal presente nos dados. O processamento foi realizado por leitura em fluxo direto de dentro do arquivo compactado, em blocos de 500 mil linhas. O resultado foi uma base de 18.025.347 linhas (876,7 MB). Pré-Processamento e Engenharia de Atributos Do schema original, foram descartadas as colunas cpi, mem_gps e mpki (aproximadamente 68% de valores ausentes, fora do escopo do plano de trabalho) e disk_io_percent (valores inválidos). Foram mantidas as colunas de identificação e as métricas-alvo: cpu_util_percent, mem_util_percent, net_in e net_out. Cada série foi ordenada por contêiner e por tempo, e foram geradas variáveis de lag (1, 2, 3, 6 e 12 passos anteriores) e médias móveis (janelas de 3, 6 e 12 passos), calculadas separadamente por contêiner. O horizonte de predição foi definido como um passo à

frente. Linhas nas bordas de cada contêiner foram removidas. A base final, com 18.021.440 linhas e 44 colunas, foi dividida em treino (70%), validação (15%) e teste (15%), separadamente por contêiner e respeitando a ordem cronológica interna. Modelos Preditivos e Métricas de Avaliação Foram treinados e comparados cinco modelos supervisionados: Regressão Linear, Árvore de Decisão, Random Forest (100 estimadores), XGBoost (200 estimadores) e Perceptron Multicamadas (duas camadas ocultas de 64 e 32 neurônios), para cada uma das quatro métricas-alvo, totalizando vinte combinações. A avaliação foi realizada sobre o conjunto de teste, por meio de MAE, RMSE e R^2. Avaliação de Robustez por Perfil de Carga Para avaliar a robustez dos modelos em diferentes perfis de carga, os 300 contêineres foram classificados em três perfis conforme o desvio padrão do uso de CPU: estável, moderado e instável. Os melhores modelos identificados para cada métrica-alvo foram então avaliados separadamente em cada perfil.

Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados da comparação entre os cinco modelos preditivos, a investigação de uma anomalia identificada no desempenho do XGBoost para métricas de rede, e a avaliação de robustez por perfil de carga. Comparação entre os Modelos Preditivos A Tabela 1 apresenta o RMSE obtido por cada modelo para cada uma das quatro métricas-alvo. De modo geral, os cinco modelos apresentaram desempenho satisfatório: para memória, todos alcançaram R^2 acima de 0,999; para as métricas de rede, quatro dos cinco modelos alcançaram R^2 próximo de 1,0, refletindo a forte autocorrelação entre valores consecutivos capturada pelas variáveis de lag. Para CPU, o melhor desempenho foi obtido pelo MLP (MAE 1,0073; RMSE 1,9965; R^2 0,9631), seguido de perto pelo XGBoost (MAE 1,0123; RMSE 2,0545; R^2 0,9609) e pelo Random Forest (MAE 1,0513; RMSE 2,1521; R^2 0,9571). A Regressão Linear apresentou o maior RMSE entre os modelos para essa métrica (2,1925), evidenciando que a demanda de CPU possui componente não linear que os modelos baseados em árvore e a rede neural capturam com maior eficácia. A diferença de desempenho entre a Regressão Linear e o MLP para CPU, embora numericamente modesta em termos absolutos, representa uma redução de aproximadamente 9% no erro, o que pode ser relevante em decisões de escalonamento operando sobre margens de segurança estreitas. Investigação do Desempenho do XGBoost em Métricas de Rede Observou-se um desempenho anômalo do XGBoost especificamente nas métricas de rede: R^2 de apenas 0,0471 para net_in e 0,8055 para net_out, valores muito inferiores aos demais modelos para essas mesmas métricas (R^2 próximo de 1,0). Esse comportamento não se repete para CPU e memória, onde o XGBoost apresenta desempenho competitivo com os demais. A investigação da distribuição das variáveis net_in e net_out revelou forte assimetria (coeficiente de assimetria de 12,62 e 8,20, respectivamente), com a maioria dos valores concentrada próxima de zero e poucos valores extremos na cauda da distribuição. Testou-se uma correção por meio de transformação logarítmica (log1p) da variável-alvo, combinada a hiperparâmetros mais conservadores (maior número de estimadores, menor taxa de aprendizado e regularização adicional). A transformação logarítmica produziu melhora parcial: o R^2 de net_out subiu de 0,8055 para 0,9024, mas o de net_in permaneceu baixo (de 0,0471 para 0,0956), ainda distante dos demais modelos. Diante do retorno decrescente da correção e da disponibilidade de modelos com desempenho já excelente para essas métricas (Regressão Linear e MLP, ambos com R^2 próximo de 1,0), optou-se por não seguir ajustando o XGBoost para rede,

registrando o achado como uma limitação específica desse algoritmo perante distribuições fortemente assimétricas de cauda longa: uma contribuição analítica do trabalho, e não uma lacuna metodológica. Avaliação de Robustez por Perfil de Carga Os 300 contêineres da amostra foram classificados em três perfis por variabilidade de CPU: estável (n = 99), moderado (n = 99) e instável (n = 102). Os melhores modelos identificados anteriormente (MLP para CPU e memória, Regressão Linear para net_in e net_out) foram avaliados separadamente em cada perfil, no conjunto de teste. Para memória e rede, a robustez foi quase perfeita: o R^2 permaneceu acima de 0,998 em todos os perfis, sem degradação relevante entre contêineres estáveis e instáveis. Para CPU, contudo, observa-se um padrão relevante: o erro absoluto cresce significativamente em contêineres instáveis (MAE 1,6905; RMSE 2,9942) em comparação a contêineres estáveis (MAE 0,3927; RMSE 0,7074), quase quatro vezes maior. Curiosamente, o R^2 é mais alto no perfil instável (0,9349) do que no estável (0,8771), o que se explica pelo fato de essa métrica medir a proporção de variância explicada: contêineres instáveis possuem maior variância total, de modo que o modelo consegue acompanhar bem a tendência geral mesmo com maior erro absoluto em unidades reais, já que a magnitude das próprias variações é maior nesses contêineres. Essa constatação tem implicação prática direta para o escalonamento: decisões automatizadas baseadas no modelo de predição de CPU devem considerar uma margem de erro maior para aplicações com padrões de carga voláteis, ao passo que, para memória e rede, o modelo mantém-se confiável independentemente do perfil de comportamento da aplicação.

Conclusão

Este trabalho atingiu seu objetivo geral ao desenvolver e comparar modelos preditivos baseados em aprendizado de máquina supervisionado, capazes de estimar com antecedência a demanda de CPU, memória e rede em aplicações executadas em um cluster Kubernetes. Os seis objetivos específicos estabelecidos no plano de trabalho foram integralmente cumpridos: os principais algoritmos de aprendizado supervisionado aplicáveis à predição de séries temporais foram estudados e comparados; um ambiente de monitoramento real, baseado em Prometheus e cAdvisor, foi implementado e validado sobre um cluster Kubernetes; os dados foram pré-processados por meio de limpeza, normalização, engenharia de atributos e segmentação temporal adequada; cinco modelos preditivos foram treinados e comparados por meio de MAE, RMSE e R^2; a robustez e a generalização dos modelos foram avaliadas em diferentes perfis de carga; e o processo e os resultados obtidos foram documentados ao longo deste trabalho. Os resultados evidenciaram que memória e rede podem ser previstas com precisão quase perfeita a partir do histórico recente, enquanto a predição de CPU, embora mantenha boa capacidade explicativa geral, apresenta maior erro absoluto em cargas de trabalho voláteis, um achado com implicação direta sobre a margem de segurança recomendada para decisões automatizadas de escalonamento baseadas nesse modelo. A investigação do desempenho anômalo do XGBoost em métricas de rede, motivada pela distribuição fortemente assimétrica dessas variáveis, reforça a importância de uma análise crítica dos resultados, e não apenas da comparação superficial de métricas agregadas. Como principal limitação do estudo, destaca-se a impossibilidade de expor métricas de rede por contêiner via cAdvisor no ambiente de monitoramento local implementado, restrição técnica documentada e testada, que reforçou (mas não constituiu a justificativa principal para) a opção por um dataset público na etapa de treinamento. Destaca-se

também que os dados de treinamento refletem um cluster de produção de terceiros, e não o cluster específico do ProjetoPesquisa PVG21389-2023, o que deverá ser considerado na eventual recalibração dos modelos com dados do ambiente-alvo. Para trabalhos futuros, sugere-se: a integração dos modelos preditivos aqui desenvolvidos à lógica automatizada de escalonamento do projeto principal; a investigação de alternativas para expor métricas de rede por contêiner no ambiente de monitoramento local, como a troca do plugin de rede (CNI) ou a implantação de um cAdvisor dedicado; e a extensão da avaliação de robustez a outros tipos de perfil de carga e aplicações, à medida que dados reais do ambiente-alvo se tornem disponíveis.

Referências

BURNS, Brendan et al. Kubernetes: up and running. O'Reilly Media, Inc., 2022. CNCF. Cloud Native Computing Foundation, 2023. Disponível em: https://www.cncf.io/. Acesso em: 17 ago. 2026. DANG-QUANG, Nhat-Minh; YOO, Myungsik. Deep learning-based autoscaling using bidirectional long short-term memory for kubernetes. Applied Sciences, v. 11, n. 9, p. 3835, 2021. GÉRON, Aurélien. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2019. KHALEQ, Abeer Abdel; RA, Ilkyeun. Intelligent autoscaling of microservices in the cloud for real-time applications. IEEE Access, v. 9, p. 35464-35476, 2021. PAHL, Claus et al. Cloud container technologies: a state-of-the-art review. IEEE Transactions on Cloud Computing, v. 7, n. 3, p. 677-692, 2017. RAO, Dattaraj. Keras to Kubernetes: The journey of a machine learning model to production. John Wiley & Sons, 2019. TOKA, László et al. Machine learning-based scaling management for kubernetes edge clusters. IEEE Transactions on Network and Service Management, v. 18, n. 1, p. 958-972, 2021.

Anexos



Figura1_status_cluster.png



Figura2_cpu_prometheus.png



Figura3_memoria_prometheus.png



Figura4_limitacao_rede.png



Figura5_rmse_por_modelo.png



Figura6_mae_por_perfil.png

CÓDIGO: ET1727

AUTOR: JOSUEL DOS SANTOS ARAÚJO

ORIENTADOR: KESIA KARINA DE OLIVEIRA SOUTO SILVA

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS MAIS SUSTENTÁVEIS BASEADAS EM MEMBRANAS E ADSORÇÃO PARA O TRATAMENTO DE FÁRMACOS

Resumo

O despejo inadequado de efluentes industriais em corpos d'água representa um dos principais desafios ambientais contemporâneos, comprometendo a qualidade dos recursos hídricos e a saúde dos ecossistemas aquáticos. Assim, este projeto de pesquisa propõe contribuir com novos materiais, por meio da utilização de membranas, advindos de matérias-primas residuais, para aplicação em processos de descontaminação de sistemas aquosos contendo poluentes. Tem-se as técnicas de adsorção empregadas para o processo de filtração. A pesquisa abrange a otimização da produção dos materiais, caracterizações por técnicas analíticas instrumentais, análise do desempenho operacional, potencial de reuso, comparação com métodos convencionais e conformidade com normas ambientais nacionais, a fim de fornecer alternativas economicamente viáveis e ambientalmente amigáveis para o tratamento de efluentes industriais e águas contaminadas.

Palavras-chave: Membranas nanoestruturas, Adsorção, Fármacos

TITLE: Development of More Sustainable Membrane- and Adsorption-Based Technologies for the Treatment of Pharmaceuticals

Abstract

The improper discharge of industrial effluents into water bodies represents a major contemporary environmental challenge, compromising water resource quality and the health of aquatic ecosystems. Accordingly, this research project proposes contributing new membrane-based materials derived from waste feedstocks for use in the decontamination of pollutant-laden aqueous systems, employing adsorption techniques within the filtration process. The research encompasses material production optimization, characterization via instrumental analytical techniques, operational performance analysis, reuse potential, comparison with conventional methods, and compliance with national environmental standards, aiming to provide economically

viable and environmentally friendly alternatives for treating industrial effluents and contaminated water.

Keywords: Nanostructured membranes, Adsorption, Pharmaceuticals

Introdução

A crescente utilização de produtos farmacêuticos pela sociedade tem contribuído para a introdução contínua de diferentes compostos bioativos nos sistemas aquáticos. Nesse cenário, fármacos bem como os resíduos da indústria têxtil, utilizados pela sociedade, podem alcançar águas residuárias e promover a ação de contaminantes de difícil tratamento e remoção. Embora frequentemente encontrados em concentrações relativamente baixas, esses compostos apresentam elevada atividade biológica e se permeiam no ambiente com elevada duração, constituindo uma preocupação ambiental devido aos possíveis efeitos sobre organismos aquáticos e à qualidade dos recursos hídricos (HOMEM, SANTOS 2011). Dentre os contaminantes farmacêuticos de maior relevância ambiental encontram-se os antibióticos e outros fármacos considerados contaminantes emergentes, cuja ocorrência em ambientes aquáticos tem despertado crescente interesse científico (PATEL et al., 2019). A exposição contínua dos ecossistemas a esses compostos pode provocar alterações em comunidades microbianas, interferir em processos biológicos e contribuir para a seleção de microrganismos resistentes. Dessa forma, no estudo apresentado por Riveira-Utrilla et al., (2013), tem-se a contribuição de que a presença de fármacos em águas residuárias representa um desafio que ultrapassa a necessidade de remoção de matéria orgânica convencionalmente empregada nos sistemas de tratamento, exigindo o desenvolvimento de estratégias direcionadas à retenção de moléculas presentes em baixas concentrações e com diferentes propriedades físico-químicas. Nessa ótica, mediante aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), em destaque na Figura 1, cabe ressaltar os de número: 04, 06, 09, 11, 12, 13,14 e 15, dos quais é possível identificar que as tecnologias empregadas na remoção de contaminantes emergentes se torna um caminho viável, principalmente, quando se utiliza de materiais com características de ter economia circular e minimizar rejeitos prejudiciais nos ambientes aquíferos. Para além disso, cabe destacar que a indústria têxtil, por intermédio de dados obtidos, evidencia uma preocupação em detrimento do descarte em larga escala, sobretudo de corantes e demais rejeitos que se agregam e dificultam o tratamento desses efluentes WANG, JIANGI e GAO (2022), YASEEN e SCHOLZ (2019) . O tratamento desse efluente possui sua eficiência limitada diante de determinados contaminantes emergentes, pois, em muitos casos, a remoção incompleta desses compostos resulta na sua permanência nos efluentes tratados e, consequentemente, na introdução contínua dessas substâncias nos ambientes aquáticos. Por fim, a comparação dos materiais e processos propostos com tecnologias convencionais descritas na literatura permitirá discutir aspectos relacionados à eficiência, custo, possibilidade de reutilização, potencial de escalonamento e sustentabilidade. Dessa maneira, espera-se que o desenvolvimento dessa abordagem possa contribuir não apenas para a obtenção de materiais com potencial aplicação no tratamento de águas contaminadas por fármacos, mas também para a construção de uma estratégia tecnológica baseada na integração entre materiais funcionais, adsorção, separação por membranas e valorização de resíduos

industriais, aproximando o desenvolvimento científico das demandas atuais por soluções ambientalmente mais sustentáveis.

Metodologia

Membrana nanoestruturada de acetato de celulose dopada

Foi utilizado o filtro de acetato de celulose adquirido comercialmente. Sob agitação constante e em temperatura ambiente, esse material foi disperso em acetona P.A por um tempo de 1h. Por intermédio de cálculos estequiométricos, obteve-se uma quantidade do material SBA-15, do qual foi incorporado na mistura sob agitação por 30 minutos. Para evitar a formação de bolhas de ar, utilizou-se de um sonicador ultrassônico com tempo de uso de 20 minutos.

Na segunda etapa, essa solução foi despejada em uma placa de petri e logo em seguida, submergida em água pura com temperatura entre 20ºC a 10ºC e se iniciou o processo de coagulação.

A terceira etapa contou com a secagem em estufa por 5h e posterior lavagem com aguá pura e outra secagem por 12h.

Teste preliminar de adsorção

A adsorção por coluna é um método do qual consiste no processo de separação.

No contexto para obtenção de testes nas membranas, foi preparada uma solução de tetraciclina 500 ppm para um volume de 1L. Para os devidos testes preliminares, utilizou-se de uma pipeta com volume de 5 mL, de 0,02 g de mebrana de acetato e de uma solução a 100 ppm. Essa solução constituiu como a alimentação, ou seja, o líquido que permeou o adsorvente, que corresponde a membrana de acetato de celulose. Por ausência de um sistema mais robusto, como uma bomba, necessitou-se da inserção de seringa da qual exerceu pressão. O líquido recolhido em uma proveta, cerca de 1 mL foi dissolvido em 3 mL de água pura e foi levado para análise no UV-VIS.

Resultados e Discussões

A microscopia eletrônica de varredura da membrana, constituída por acetato de celulose, acetona, SBA-15 e glicerina, evidencia, na Figura 2, uma estrutura porosa formada durante o processo de inversão de fases. Na magnificação de 1000× observa-se uma distribuição relativamente homogênea de pequenas cavidades sobre a superfície, enquanto nas ampliações de 5000× e 10000× torna-se evidente uma estrutura com poros de diferentes dimensões, incluindo regiões com cavidades maiores e aparentemente interconectadas.

Esse comportamento encontra respaldo na literatura para membranas de acetato de celulose preparadas por inversão de fases. Wang et al., (2021) demonstraram que a razão glicerol/acetato de celulose exerce influência significativa sobre a estrutura formada, promovendo uma transição de estruturas do tipo “finger-like” para estruturas mais homogêneas, semelhantes a uma esponja. Os autores atribuíram esse efeito à atuação do glicerol como agente formador de poros e modificador da cinética de separação de fases.

Além disso, é possível encontrar na literatura, estudos que demonstram que a alteração da razão glicerol/CA pode modificar simultaneamente porosidade, tamanho dos poros e permeabilidade. Em determinadas condições, foram relatadas porosidades superiores a 90% para membranas de CA contendo glicerol.

No que consistiu as demais caracterizações, as curvas TG/DTG disponíveis para as membranas, representadas na Figura 3, apresentam um comportamento bastante semelhante: após uma região inicial de relativa estabilidade, ocorre uma perda de massa pronunciada aproximadamente entre 300 e 400 °C, acompanhada por um máximo na curva DTG próximo dessa região. Esse resultado está de acordo com trabalhos publicados para materiais de acetato de celulose. Estudos apresentados por Alahmadi e Hussein (2022), de TGA, indicam que a degradação principal do acetato de celulose ocorre aproximadamente entre 300 e 400 °C, sendo atribuída a processos de degradação da cadeia polimérica. Em membranas de CA, também foram observados eventos de degradação nessa faixa de temperatura. Dessa forma, o comportamento observado nas membranas deste trabalho pode ser associado predominantemente à decomposição da matriz de acetato de celulose, e não à decomposição da SBA-15, que é uma fase inorgânica termicamente muito mais estável.

No que consiste ao processo de adsorção, após a avaliação preliminar da capacidade adsortiva da membrana em sistema descontínuo, foi realizado um ensaio exploratório em fluxo, empregando a membrana composta por acetato de celulose, SBA-15 e glicerina. Para o ensaio, foram utilizados aproximadamente 0,020 g de membrana e uma solução de tetraciclina com concentração inicial de 100 mg L^{-1}. Diferentemente de sistemas convencionais de adsorção em leito fixo, nos quais a alimentação é realizada por meio de bombas peristálticas ou outros dispositivos capazes de controlar a vazão, o sistema desenvolvido neste trabalho operou sob fluxo gravitacional, com aplicação manual de pressão por meio de uma seringa acoplada ao sistema de alimentação.

Essa configuração foi adotada em razão da indisponibilidade de uma bomba específica para controle da vazão. Consequentemente, não foi possível estabelecer uma vazão constante ou associar cada coleta a um intervalo de tempo rigorosamente definido. As amostras foram coletadas sequencialmente, em volumes de aproximadamente 1 mL, e posteriormente submetidas à diluição, sendo transferido 1 mL do efluente para 3 mL de água destilada antes da análise por espectrofotometria UV-Vis. Dessa forma, ainda se fará novos testes para avaliação preliminar do comportamento da membrana em fluxo, e não como uma curva de ruptura convencional de coluna com vazão controlada.

Conclusão

Por fim, o desenvolvimento das membranas de acetato de celulose modificadas demonstrou potencial para aplicação na remoção de contaminantes farmacêuticos em sistemas aquosos. A incorporação da SBA-15 e da glicerina promoveu alterações na morfologia da matriz polimérica, sendo observada, para a membrana composta por: acetato de celulose + acetona + SBA-15 + glicerina, uma estrutura com elevada quantidade aparente de poros e diferentes dimensões de cavidades. Essa característica é relevante para a proposta do trabalho, uma vez que a associação entre a matriz polimérica e a fase mesoporosa pode favorecer o contato entre o contaminante e os sítios disponíveis para a adsorção.

Os ensaios de adsorção evidenciaram elevada remoção de tetraciclina, especialmente nos primeiros estágios do processo, indicando que a membrana apresenta potencial para atuar como material multifuncional, combinando separação e adsorção. Esse comportamento está de acordo com a proposta de utilização do acetato de celulose como matriz estrutural e da SBA-15 como fase porosa capaz de ampliar a interação com moléculas presentes na fase aquosa. O ensaio preliminar em fluxo, realizado com solução de tetraciclina a 100 ppm e aproximadamente 0,020 g de membrana, também demonstrou a viabilidade da utilização do material em um sistema de passagem da solução pela membrana. Entretanto, por ter sido conduzido sob fluxo gravitacional e com aplicação manual de pressão, sem controle instrumental da vazão, os resultados devem ser considerados exploratórios, não sendo possível determinar, nas condições empregadas, parâmetros clássicos de ruptura e saturação de uma coluna operada em vazão constante.

De modo geral, os resultados obtidos sustentam a viabilidade inicial da utilização de membranas de acetato de celulose modificadas com SBA-15 e glicerina para o tratamento de soluções contendo tetraciclina e novos futuros testes empregando o lodo têxtil na membrana. A estratégia apresentada pode ter um potencial de ampliação para sistemas mais sustentáveis, particularmente pela possibilidade de integrar materiais funcionais, processos de adsorção e separação por membranas e, em etapas posteriores, materiais derivados de resíduos têxteis, conforme proposto no projeto. Contudo, são necessários estudos adicionais de repetibilidade, equilíbrio, regeneração e operação em fluxo com vazão controlada para confirmar o desempenho do material e avaliar sua viabilidade para aplicações contínuas e em maior escala.

Referências

PATEL, Manvendra; KUMAR, Rahul; KISHOR, Kamal; MLSNA, Todd; PITTMAN JR., Charles U.; MOHAN, Dinesh. Pharmaceuticals of emerging concern in aquatic systems: chemistry, occurrence, effects, and removal methods. Chemical Reviews, v. 119, n. 6, p. 3510–3673, 2019. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00299.

UNITED NATIONS. General Assembly. Resolution A/RES/70/1: Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations, 2015. Disponível em:https://undocs.org/A/RES/70/1. Acesso em: 31 ago. 2026.

WANG, Xiaoxuan; JIANG, Jinming; GAO, Weijun. Reviewing textile wastewater produced by industries: characteristics, environmental impacts, and treatment strategies.

Water Science and Technology, v. 85, n. 7, p. 2076–2096, 2022. DOI: 10.2166/wst.2022.088.

YASEEN, D. A.; SCHOLZ, M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 16, n. 2, p. 1193–1226, 2019. DOI: 10.1007/s13762-018-2130-z.

Anexos



Figura 1



Figura 2



Figura 3

CÓDIGO: ET1739

AUTOR: NICHOLAS WALLACE LOPES

ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO TRABUCO DOREA

TÍTULO: Controle de Sistemas com Atraso sob Restrições e Saturação utilizando a Linguagem Julia

Resumo

Este artigo aborda o problema de seguimento de referência para sistemas lineares discretos sujeitos a restrições operacionais e atrasos na entrada. Embora os métodos tradicionais baseados em conjuntos invariantes sejam utilizados com sucesso para garantir restrições nos estados e nas entradas, eles podem ser conservadores em sistemas com atraso, pois não consideram a magnitude específica desse atraso.

Dessa forma, é proposta uma extensão de técnicas recentes de invariância de conjuntos dependente do atraso para o problema de rastreamento de referência. Por meio de uma transformação específica do modelo, a dinâmica do sistema é desacoplada de forma a incorporar explicitamente o tamanho do atraso nas condições de invariância.

O problema de rastreamento é formulado utilizando um modelo de espaço de estados aumentado, que incorpora o erro de rastreamento e sua integral, transformando efetivamente o problema de rastreamento em um problema de regulação.

São então obtidas condições de invariância dependentes do atraso para conjuntos poliédricos, que são posteriormente convertidas em um problema de otimização bilinear. Essa abordagem permite realizar simultaneamente a síntese dos ganhos do controlador e de um conjunto invariante capaz de garantir o cumprimento das restrições durante toda a trajetória de rastreamento.

Por fim, um exemplo numérico é apresentado para demonstrar a eficácia da abordagem proposta.

Palavras-chave: Sistemas Lineares, atraso, segmento de referência, conjuntos invariant

TITLE: Constrained Reference Tracking for LinearSystems with Delayed Input

Abstract

This paper addresses the reference tracking problem for linear discrete-time systems

subject to both operational constraints and input delays. While traditional set-invariance

methods have been successfully used to enforce state and input constraints, they can prove

conservative in time-delay systems as they do not account for the specific magnitude of the

delay. We then propose an extension of recent delay-dependent set-invariance techniques to the

reference tracking framework. By employing a specific model transformation, we decouple the

system’s dynamics to explicitly incorporate the delay size into the invariance conditions. The

tracking task is formulated using an augmented state-space model that incorporates tracking

error and its integral, effectively recasting the problem into a regulation format. We derive delay-

dependent conditions for the invariance of polyhedral sets and translate them into a bilinear

optimization problem. This approach enables the simultaneous synthesis of controller gains

and an invariant set that ensures constraint satisfaction throughout the tracking trajectory. A

numerical example is provided to demonstrate the effectiveness of the proposal.

Keywords: Linear systems, time-delay, reference tracking, invariant sets

Introdução

O artigo trata do problema de rastreamento de referência em sistemas lineares discretos sujeitos a atrasos na entrada, além de restrições nas variáveis de estado e no sinal de controle. Esse tipo de problema é importante porque, em aplicações reais, os estados do sistema e os sinais de atuação normalmente possuem limites físicos ou de segurança que não podem ser ultrapassados. A presença de um atraso na entrada torna o projeto do controlador ainda mais difícil, pois o efeito de uma ação de controle só aparece no sistema depois de um determinado número de períodos de amostragem.

Uma das ferramentas utilizadas para lidar com restrições são os conjuntos positivamente invariantes. A ideia é encontrar uma região do espaço de estados na qual, uma vez que o sistema entre, sua trajetória permaneça dentro dessa região ao longo do tempo, garantindo o cumprimento das restrições. Entretanto, métodos tradicionais de invariância podem ser conservadores em sistemas com atraso, pois suas condições não levam em consideração o tamanho específico do atraso. Assim, o controlador pode ser projetado considerando situações de atraso mais severas do que aquela que realmente existe no sistema.

Trabalhos anteriores desenvolveram condições de invariância dependentes do atraso, permitindo considerar explicitamente a magnitude do atraso na análise de estabilidade e invariância. Porém, grande parte desses estudos estava voltada para o problema de regulação, no qual o objetivo é levar o estado do sistema para a origem. O presente

trabalho busca ampliar essa ideia para o problema de rastreamento de referência, no qual a saída do sistema deve acompanhar um determinado valor de referência.

Dessa forma, o objetivo principal do artigo é desenvolver um método capaz de projetar simultaneamente um controlador e um conjunto invariante, garantindo que o sistema acompanhe a referência enquanto respeita as restrições de estado e de controle, considerando explicitamente o atraso presente na entrada.

Metodologia

Inicialmente, consideramos um sistema linear discreto com atraso na entrada, representado por

x(k+1)=Ax(k)+Bu(k−d),x(k+1), em que d representa o número de períodos de amostragem correspondente ao atraso. O sistema possui restrições tanto nos estados quanto na entrada de controle. O objetivo é encontrar um controlador capaz de fazer a saída y(k)y(k) convergir para uma referência constante r(k)r(k), sem violar essas restrições.

Para realizar o rastreamento, os autores introduzem uma referência filtrada ω(k)\omega(k). Em vez de fazer a referência mudar instantaneamente, ela passa por uma dinâmica de primeira ordem. O parâmetro δ\delta controla a velocidade dessa filtragem: valores menores de δ\delta fazem com que a referência filtrada acompanhe mais rapidamente a referência original. Essa estratégia suaviza as mudanças de referência e facilita o cumprimento das restrições do sistema.

Além disso, é adicionada uma ação integral por meio de uma nova variável v(k):

v(k+1)=v(k)+T(ω(k)−Cx(k)).v(k+1). Essa ação integral tem a função de eliminar o erro estacionário de rastreamento. Com essas novas variáveis, o modelo original é transformado em um modelo de estado aumentado, contendo os estados originais x(k)x(k), a variável integral v(k) e a referência filtrada ω(k).

Em seguida, os autores utilizam uma lei de controle do tipo

u(k)=K_x x(k)+K_v v(k)+K_ω ω(k), que possui características semelhantes a um controlador PI, juntamente com um termo de feedforward associado à referência. Com essa lei de controle, o problema de rastreamento pode ser reescrito como um problema de regulação de um sistema aumentado com atraso.

A principal contribuição metodológica aparece na análise dos conjuntos invariantes dependentes do atraso. Os autores introduzem uma transformação no modelo utilizando uma variável auxiliar KK. Essa transformação permite separar, de certa forma, os efeitos que são independentes do atraso daqueles que dependem diretamente de sua magnitude. Como consequência, as condições de invariância passam a conter explicitamente o valor do atraso dd.

Depois, é definido um conjunto poliédrico

$\Omega=\{\xi|F\xi\leq1\}$,\Omega=\{\xi\mid F\xi\leq 1\},que representa uma região segura do espaço de estados aumentado. Os autores estabelecem condições matemáticas que garantem que esse conjunto seja robustamente invariante mesmo na presença das referências consideradas como perturbações. Essas condições são expressas por meio de diversas matrizes auxiliares e desigualdades matriciais.

As restrições do sistema também são incorporadas ao problema. Primeiro, é garantido que o conjunto invariante esteja contido no conjunto permitido para os estados. Depois, as restrições sobre o sinal de controle são convertidas em restrições sobre o estado utilizando a própria lei de controle. Assim, se a trajetória permanecer dentro do conjunto invariante, tanto as restrições de estado quanto as restrições de entrada serão respeitadas.

Por fim, todas essas condições são incorporadas a um problema de otimização bilinear não convexo. O objetivo é determinar simultaneamente os ganhos do controlador e o conjunto invariante. O artigo utiliza o solver KNITRO para resolver esse problema.

Resultados e Discussões

Para verificar a proposta, utilizamos um modelo linearizado de uma planta de tanques acoplados, discretizado com período de amostragem $T=0,5$ sT=0,5\,s. O sistema possui duas variáveis de estado e uma entrada de controle. Foram impostas restrições de magnitude nos estados, com

$|xi|\leq15$,|x_i|\leq 15,e no sinal de controle,

$|u|\leq4$.|u|\leq4.Também foram estabelecidos limites para as variáveis adicionais utilizadas no controlador, sendo $|v|\leq300$|v|\leq300 e $|\omega|\leq15$|\omega|\leq15.

O problema de otimização foi resolvido considerando uma taxa de contração $\lambda=0,999$, atraso $d=2$ e parâmetro do filtro $\delta=0,8$. Como resultado, foram obtidos os ganhos

$G=[-0,7627-0,72440,03490,1065]$. Também foi obtido um poliedro invariante definido no espaço de estados aumentado de dimensão quatro.

Na simulação, a referência que inicialmente assume o valor 8 e posteriormente muda para -8. A trajetória do sistema foi analisada juntamente com o conjunto invariante calculado pelo método. Os resultados mostram que a trajetória permanece dentro da região permitida, mesmo com a mudança da referência.

As respostas temporais também mostram que os estados conseguem acompanhar a referência filtrada. Além disso, o sinal de controle permanece dentro dos limites estabelecidos. Portanto, o controlador projetado conseguiu realizar o rastreamento da referência sem violar as restrições de estado ou de controle.

Em outras palavras, o resultado numérico serve como uma demonstração de que a metodologia consegue combinar três objetivos importantes: acompanhar a referência, lidar com o atraso na entrada e manter o sistema dentro das restrições especificadas.

Conclusão

Os resultados numéricos demonstraram que o controlador foi capaz de realizar rastreamento assintótico sem erro estacionário, mantendo as restrições de estado e de controle satisfeitas, desde que as condições iniciais estejam dentro do conjunto admissível determinado pelo método.

Apesar dos resultados positivos, destaca-se uma limitação importante: o problema de otimização utilizado é não convexo e possui diversos parâmetros que precisam ser definidos pelo projetista. Isso pode dificultar a obtenção de soluções factíveis e tornar o processo de ajuste dos parâmetros mais complexo. Como perspectivas futuras, o trabalho sugere estudar formas melhores de realizar esse ajuste e incorporar métricas de desempenho temporal diretamente na função objetivo da otimização.

Em resumo: o artigo propõe uma maneira de projetar um controlador para sistemas lineares com atraso que consiga seguir uma referência sem erro estacionário e, ao mesmo tempo, respeitar limites físicos do sistema, utilizando conjuntos invariantes dependentes do atraso e otimização bilinear.

Referências

Blanchini, F. and Miani, S. (2015). Set-Theoretic Methods

in Control. Birkh¨auser Basel, 2nd edition.

Bri˜ao, S.L., Castelan, E.B., Camponogara, E., and

Ernesto, J.G. (2021). Output feedback design for

discrete-time constrained systems subject to persistent

disturbances via bilinear programming. Journal of the

Franklin Institute, 358(18), 9741–9770.Byrd, R.H., Nocedal, J., and Waltz, R.A. (2006). Knitro:

An integrated package for nonlinear optimization. In

G. Di Pillo and M. Roma (eds.), Large-Scale Nonlinear

Optimization. Springer, Boston.

D´orea, C.E.T., Olaru, S., Niculescu, S.I., and R˘asvan, V. (2024). Delay-dependent set-invariance for linear difference equations with multiple delays: a polyhedral approach. Journal of Difference Equations and Applications, 30(10), 1644–1661. doi: 10.1080/10236198.2024.2311674.

D´orea, C.E., Olaru, S., and Niculescu, S.I. (2023). Delay-dependent invariance of polyhedral sets for discrete-time linear systems. IFAC-PapersOnLine, 56(2), 3259–3264. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1466. 22nd IFAC World Congress.

Hennet, J.C. and Tarbouriech, S. (1998). Stability conditions of constrained delay systems via positive invariance. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 8(3), 265–278.

Laraba, M.T., Olaru, S., Niculescu, S.I., Blanchini, F., Giordano, G., Casagrande, D., and Miani, S. (2016). Guide on set invariance for delay difference equations. Annual Reviews in Control, 41, 13–23.

Lombardi, W., Olaru, S., Lazar, M., and Niculescu, S.I. (2011). On positive invariance for delay difference equations. In Proceedings of the 2011 American Control Conference, 3674–3679. IEEE.

Martins, J., Meneghetti, F., and D´orea, C. (2022). An

optimization-based method for tuning pi controllers for systems subject to control and output constraints. PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY, 98, 145–153. doi:10.15199/48.2022.12.35.

Niculescu, S.I. (2001). Delay effects on stability: a robust control approach, volume 269. Springer Science & Business Media.

Normey-Rico, J.E. and Camacho, E.F. (2007). Control of Dead-time Processes. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer, London.

Quanser Inc. (2015). Coupled Tanks – Data Sheet. Quanser Inc., Markham, Ontario, Canada. V1.3.

Santos, G.F.d., Castelan, E.B., and Lucia, W. (2023). On the design of constrained pi-like output feedback tracking controllers via robust positive invariance and bilinear programming. IEEE Control Systems Letters, 7, 1429–1434. doi:10.1109/LCSYS.2023.3251312

CÓDIGO: ET1751

AUTOR: STEPHANY MAYARA BEZERRA PEREIRA COSTA

COAUTOR: THAYS PRISCILA MACIEL PEGADO

ORIENTADOR: IRIS OLIVEIRA DA SILVA

TÍTULO: Produção de hidrogéis para curativos têxteis com biopolímeros

Resumo

A engenharia de tecidos tem desenvolvido novos materiais ou dispositivos capazes de interações específicas com as partes biológicas, sempre na busca de materiais biocompatíveis. Uma variedade de estruturas, como hidrogéis poliméricos sintéticos e naturais, têm sido estudadas no reparo de estruturas epidérmicas danificadas. Um hidrogel de interesse particular na regeneração de tecidos cutâneos lesados é o composto de quitosana e extratos natural de crajiru. Pretende-se investigar o uso desse hidrogel em aplicações em fibras têxteis para utilização na Engenharia de Tecidos, com resultados promissores. Com base nessas informações, o objetivo deste trabalho é investigar as alternativas disponíveis para a regeneração tecidual de ferimentos e lesões na epiderme, utilizando hidrogéis a base quitosana e extrato de crajiru, afim de se conhecer mais detalhadamente as relações entre células e novos biomateriais ainda não estudados.

Palavras-chave: Hidrogel; quitosana; curativo;

TITLE: Production of hydrogels for textile dressings using biopolymers.

Abstract

Tissue engineering has been developing new materials or devices capable of specific interactions with biological components, consistently seeking biocompatible materials. A variety of structures—such as synthetic and natural polymeric hydrogels—have been studied for the repair of damaged epidermal structures. A hydrogel of particular interest for the regeneration of injured skin tissue is one composed of chitosan and natural crajiru extract. Research into the application of this hydrogel to textile fibers for use in tissue engineering has yielded promising results. Based on this, the aim of this study is to investigate available alternatives for the regeneration of epidermal wounds and lesions using chitosan- and crajiru extract-based hydrogels, in order to gain a more detailed understanding of the interactions between cells and these novel, previously unstudied biomaterials.

Keywords: Hydrogel; chitosan; dressing;

Introdução

O desenvolvimento de biomateriais para aplicações na área da saúde tem despertado crescente interesse científico, especialmente na produção de materiais destinados ao tratamento e à proteção de lesões cutâneas. Nesse contexto, os hidrogéis se destacam por sua estrutura tridimensional, elevada capacidade de retenção de água e possibilidade de incorporar e disponibilizar compostos bioativos, características que favorecem sua utilização como sistemas para curativos (ZHAO et al., 2023; YUAN et al., 2023).
Entre os materiais utilizados na produção de hidrogéis, a quitosana apresenta especial interesse devido à sua biocompatibilidade, biodegradabilidade e propriedades antimicrobianas, além da presença de grupos funcionais que possibilitam diferentes estratégias de modificação e associação com outros componentes (KIM et al., 2022; ZHAO et al., 2023). Essas características tornam a quitosana uma alternativa relevante para o desenvolvimento de curativos e sistemas de liberação de agentes bioativos.
Paralelamente, o crajiru (Fridericia chica) tem despertado interesse científico devido à presença de compostos bioativos e ao histórico de utilização de suas folhas na medicina tradicional, incluindo aplicações relacionadas a processos inflamatórios, infecções e cicatrização. Estudos recentes destacam, entretanto, a necessidade de ampliar as investigações sobre suas aplicações tecnológicas e biomédicas (SOUZA et al., 2025).
Nesse contexto, o projeto propõe o desenvolvimento de hidrogéis constituídos por biopolímeros e extrato de crajiru, aplicados a substratos têxteis. Essa abordagem integra conhecimentos de Engenharia Têxtil, Ciência dos Materiais e Biotecnologia, buscando desenvolver materiais têxteis funcionais com potencial aplicação em curativos.

Metodologia

Preparação da solução de quitosana
A quitosana em pó foi inicialmente dispersa em solução aquosa de ácido acético sob condições de aquecimento controlado. O processo envolveu agitação contínua durante o aquecimento, favorecendo a completa solubilização do biopolímero e a obtenção de uma solução homogênea, adequada para posterior mistura com outros componentes poliméricos.
Preparação da solução de PVA
Inicialmente, foi preparada uma solução de poli(álcool vinílico) (PVA) na concentração de 10% (m/v). Para isso, foram pesados 15 g de PVA e adicionados a 150 mL de água destilada. A mistura foi realizada lentamente, sob agitação manual com bastão de vidro, evitando a formação de aglomerados. Em seguida, a solução foi submetida a banho-maria a 90 °C durante 2 h, com agitação periódica, até a completa dissolução do polímero e obtenção de uma solução homogênea.

Preparação das misturas poliméricas
Foram preparadas duas formulações: uma amostra padrão, constituída apenas pela mistura dos polímeros, e uma amostra contendo extrato vegetal.
Para a amostra padrão, as soluções de PVA e quitosana foram misturadas na proporção de 50:50 (v/v), utilizando-se 20 mL de cada solução, totalizando 40 mL. A mistura foi

submetida à agitação em mesa agitadora durante 1 h, à temperatura de 45 °C, visando à obtenção de uma dispersão homogênea.
Para a formulação contendo extrato vegetal, foram inicialmente misturados 20 mL da solução de PVA e 20 mL da solução de quitosana, mantendo-se a proporção de 50:50 (v/v). A mistura foi submetida à agitação durante 1 h, a 45 °C. Posteriormente, o extrato vegetal foi adicionado lentamente sob agitação. A mistura permaneceu em agitação por mais 30 min, ou até a completa homogeneização do sistema, obtendo-se a formulação PVA/quitosana/extrato.

Resultados e Discussões

O materia será caracterizado por FTIR, MEV, DRX

Conclusão

O materia será caracterizado por FTIR, MEV, DRX

Referências

KIM, S. et al. Advances in chitosan-based wound dressings: modifications, fabrications, applications and prospects. Carbohydrate Polymers, v. 297, p. 120058, 2022. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.120058.
SOUZA, et al. Fridericia chica (Bonpl.) L.G. Lohmann: an overview of medicinal plant studies. Journal of Medicinal Food, 2025. DOI: 10.1089/jmf.2023.0286.
YUAN, N. et al. Chitosan, alginate, hyaluronic acid and other novel multifunctional hydrogel dressings for wound healing: a review. International Journal of Biological Macromolecules, v. 240, p. 124321, 2023. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124321.
ZHAO, J. et al. Chitosan-based hydrogel wound dressing: from mechanism to applications, a review. International Journal of Biological Macromolecules, v. 244, p. 125250, 2023. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125250.

CÓDIGO: ET1756

AUTOR: FRANCISCO MICARLOS TEIXEIRA PINTO

ORIENTADOR: MARCELO AUGUSTO COSTA FERNANDES

TÍTULO: DeepMaqTwin: Construção e Validação de Gêmeos Digitais para Monitoramento de Máquinas na Indústria Têxtil

Resumo

A variabilidade de máquinas, tecidos e fios dificulta antecipar interrupções e perdas na manufatura têxtil. Este trabalho desenvolveu e validou o DeepMaqTwin, um gêmeo digital preditivo orientado a dados que integra telemetria industrial, registros de produção, composições técnicas e MLOps. A partir de 1,8 milhão de leituras de telemetria e 6.488 unidades máquina–dia–composição, três frentes preditivas foram avaliadas sob divisão temporal estrita: quebras de urdume e trama foram modeladas por regressão de contagem de Poisson com exposição, obtendo MAE de 4,89 e 4,94 quebras por unidade, respectivamente; redes neurais LSTM previram a eficiência média da hora seguinte com R^2 em torno de 0,80; e um classificador XGBoost calibrado priorizou rolos com defeitos com recall de 94,3% e precisão de 42,9%. A arquitetura em microsserviços integrou versionamento imutável (DVC/Git), registro de modelos (MLflow) e oito operações públicas via API, incluindo inferência. Os resultados demonstram a viabilidade da plataforma para alocação de teares, monitoramento preventivo e priorização de inspeções, servindo como suporte à decisão sem substituir a supervisão do operador humano.

Palavras-chave: Gêmeos digitais. Indústria têxtil. MLOps. Modelos preditivos.

TITLE: DeepMaqTwin: Construction and Validation of Digital Twins for Machinery Monitoring in the Textile Industry

Abstract

Variability in machinery, fabrics, and yarns hinders the anticipation of interruptions and losses in textile manufacturing. This work developed and validated DeepMaqTwin, a data-driven predictive digital twin integrating industrial telemetry, production records, technical compositions, and MLOps. Based on 1.8 million integrated readings and 6,488

machine–day–composition units, three predictive fronts were evaluated under strict temporal splitting: warp and weft breaks were modeled via Poisson count regression with exposure, yielding MAE of 4.89 and 4.94 breaks per unit, respectively; LSTM neural networks predicted the average efficiency of the following hour with R^2 around 0.80; and a calibrated XGBoost classifier prioritized defective rolls with 94.3% recall and 42.9% precision. The microservices architecture integrated immutable versioning (DVC/Git), model tracking (MLflow), and eight public API operations, including inference. Results demonstrate the platform's viability for loom allocation, preventive monitoring, and inspection prioritization, supporting decision-making without replacing human operator supervision.

Keywords: Digital twins. Textile industry. MLOps. Predictive models.

Introdução

A manufatura têxtil, em especial o processo de tecelagem, opera sob regimes severos de esforço mecânico e alta cadência produtiva. Nesse ambiente, a variabilidade inerente às matérias-primas, fios e composições técnicas interage continuamente com as características e o estado de conservação dos teares. Essa dinâmica resulta em frequentes interrupções por quebra de fios de urdume e de trama, oscilações na eficiência operacional e ocorrência de defeitos que depreciam o valor comercial dos rolos de tecido. No entanto, diagnosticar ou antecipar esses eventos a partir de abordagens convencionais é uma tarefa complexa no chão de fábrica, pois parâmetros de máquina, especificações do artigo e histórico operacional variam de forma simultânea e não linear.

Diante desse desafio, técnicas de mineração de dados e aprendizado de máquina têm demonstrado capacidade para identificar padrões operacionais e apoiar o controle de qualidade no setor têxtil (YILDIRIM; BIRANT; ALPYILDIZ, 2018), incluindo a modelagem preditiva de quebras de fios em ambientes industriais (AZEVEDO et al., 2022). Para consolidar essas técnicas em um fluxo contínuo de tomada de decisão, o conceito de gêmeo digital surge como uma representação computacional atualizável do ativo físico e de seus processos (KRITZINGER et al., 2018; TAO et al., 2019). Sob uma abordagem orientada a dados, essa representação dispensa formulações físicas ou tridimensionais complexas, concentrando-se na integração de telemetria, histórico de produção e variáveis contextuais para estimar o comportamento do maquinário e subsidiar decisões de monitoramento e manutenção (ERRANDONEA; BELTRÁN; ARRIZABALAGA, 2020).

Contudo, a transição de modelos preditivos isolados para uma ferramenta operacional requer governança e reprodutibilidade. Dados industriais sofrem ruídos e descontinuidades, exigindo que o ciclo de vida dos modelos seja auditável, desde a ingestão do dado bruto até o fornecimento da predição. Nesse contexto, a disciplina de Machine Learning Operations (MLOps) fornece princípios para automação, versionamento e rastreabilidade de dados e modelos, assegurando que o sistema opere de maneira consistente, transparente e escalável no chão de fábrica.

Com base nesses fundamentos, desenvolveu-se o DeepMaqTwin, uma solução preditiva para tecelagem formulada a partir de dados reais de telemetria industrial, registros de produção e fichas técnicas de fios. O sistema estrutura três frentes analíticas complementares: (i) estimativa pré-operação da contagem de quebras de urdume e trama com base na exposição produtiva; (ii) previsão da eficiência média em horizonte de uma hora via redes neurais recorrentes LSTM; e (iii) classificação do risco de defeitos moderados ou graves em rolos de tecido por árvores de decisão calibradas. Essas frentes foram integradas a uma arquitetura de microsserviços baseada em FastAPI, DVC e MLflow, viabilizando o ciclo completo de MLOps para suporte à decisão, sem substituir a supervisão do operador.

O objetivo geral foi desenvolver e validar uma plataforma preditiva orientada a dados para o monitoramento de máquinas na indústria têxtil, integrando telemetria, produção, composições técnicas, modelos de aprendizado de máquina e uma arquitetura MLOps para estimar o risco de quebra de fios, a eficiência futura e o risco de defeitos. Especificamente, buscou-se: tratar e integrar dados industriais heterogêneos; reconstruir composições de fios e configurações máquina–dia; modelar separadamente quebras de urdume e trama; prever a eficiência em horizonte de uma hora; estimar o risco de defeito moderado ou grave; implementar o ciclo MLOps com rastreabilidade ponta a ponta; e avaliar o desempenho, as limitações e a aplicabilidade industrial da plataforma.

Metodologia

O trabalho foi conduzido como uma pesquisa tecnológica aplicada, organizada em um ciclo de concepção, construção e avaliação. O objetivo foi desenvolver e validar o DeepMaqTwin, um gêmeo digital preditivo orientado a dados para monitorar o parque de teares e apoiar decisões de produção. A metodologia foi dividida em quatro etapas: integração e preparação dos dados industriais; desenvolvimento dos modelos preditivos; validação experimental com separação temporal dos dados; e disponibilização dos modelos em uma arquitetura MLOps.

Processamento e integração dos dados. Foram utilizadas três fontes industriais complementares: telemetria contínua dos teares, registros de produção e fichas técnicas dos produtos. Inicialmente, foram corrigidas inconsistências e padronizados os identificadores das máquinas e os registros de tempo. Isso permitiu relacionar as leituras dos sensores aos registros de produção por máquina e data. Na sequência, os dados foram agregados e combinados às especificações dos tecidos e às características dos fios, formando conjuntos de dados específicos para cada tarefa preditiva. A engenharia de atributos respeitou o instante em que cada informação estaria disponível no ambiente real de produção. Assim, somente dados conhecidos antes do momento da previsão foram utilizados como entrada dos modelos, reduzindo o risco de vazamento de informação entre passado e futuro.

Modelagem preditiva. A primeira frente tratou da previsão de quebras de fios antes do início da operação, considerando a unidade máquina–dia–composição. O objetivo foi fornecer informações que pudessem auxiliar na escolha e na alocação dos teares. As quebras de urdume e de trama foram modeladas separadamente como problemas de

regressão de contagem, utilizando a metragem produzida como variável de exposição. Dessa forma, foi possível estimar a taxa esperada de quebras por cem metros a partir de atributos como largura e gramatura do tecido, composição dos fios, máquina candidata e histórico de desempenho. Foram comparadas referências estatísticas baseadas em família e máquina, regressão de Poisson regularizada e modelos de gradient boosting ajustados à distribuição de Poisson.

A segunda frente teve como objetivo prever a eficiência operacional média da hora seguinte. Para isso, foram utilizadas janelas retrospectivas de duas horas de telemetria contendo variáveis operacionais como velocidade de rotação, tempos produtivos e improdutivos, paradas e quebras registradas no período anterior. Redes neurais recorrentes LSTM foram empregadas para capturar a dependência temporal dessas variáveis. Foram avaliadas uma abordagem global e abordagens especializadas por família tecnológica, com representações vetoriais das máquinas.

A terceira frente concentrou-se na priorização de rolos para inspeção de qualidade. O problema foi formulado como uma classificação binária supervisionada, separando rolos com defeitos moderados ou graves daqueles considerados conformes. Foi utilizado o algoritmo XGBoost, com ponderação da classe minoritária para lidar com o desbalanceamento entre as classes. Em seguida, as probabilidades estimadas foram submetidas à calibração sigmoide, permitindo definir um limiar de decisão adequado ao objetivo de triagem.

Validação e operacionalização. Para aproximar a avaliação do cenário real de uso, os dados foram separados de forma estritamente cronológica em conjuntos de treino, validação e teste. No modelo de quebras, foram analisados o erro médio absoluto (MAE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o desvio de Poisson e o viés agregado de contagem. A previsão de eficiência foi avaliada por MAE, RMSE e coeficiente de determinação (R^2). Para a classificação de defeitos, foram utilizadas ROC-AUC, PR-AUC, precisão, revocação e F1-score.

Após a validação, os pipelines foram incorporados a uma arquitetura de microsserviços responsável pelo ciclo operacional do gêmeo digital. A solução passou a contemplar ingestão de dados, versionamento rastreável de dados e código, registro de experimentos e métricas, controle da versão de modelo em produção e disponibilização de endpoints de inferência. Essa etapa permitiu aproximar os modelos desenvolvidos do ambiente de uso, preservando rastreabilidade e reprodutibilidade ao longo de seu ciclo de vida.

Resultados e Discussões

Integração e comportamento dos dados fabris. A consolidação das diferentes fontes industriais permitiu reconstruir o comportamento operacional de 29 teares ao longo de treze meses. Após o cruzamento entre telemetria, registros de produção e fichas técnicas, a base integrada reuniu 1,81 milhão de leituras e 6.488 configurações máquina–dia–composição. Nesse conjunto, foram contabilizadas 56.224 quebras de urdume e 41.664 de trama. A diferença entre os dois tipos de ocorrência mostra que eles

apresentam comportamentos distintos no processo produtivo e, por isso, foram tratados separadamente nas etapas de modelagem. A integração também permitiu associar as condições observadas na telemetria às especificações dos artigos produzidos e ao equipamento utilizado em cada período. Esse resultado foi importante porque evitou analisar os sinais dos teares de forma isolada do contexto real de produção.

**Predição pré-operação de quebras de fios. As quebras de urdume e trama foram modeladas como problemas de regressão de contagem, utilizando a metragem produzida como exposição. Essa escolha permitiu estimar a quantidade esperada de quebras levando em consideração diferenças no volume produzido entre máquinas e dias. No conjunto de validação temporal, o modelo de Poisson revisado apresentou MAE de 4,89 quebras por unidade máquina–dia–composição para urdume e 4,94 para trama. O viés agregado foi de −8,0% para urdume e −1,4% para trama, indicando tendência de subestimação, mais perceptível no primeiro caso. Assim, embora o erro médio permita utilizar as previsões como elemento de comparação entre alternativas de produção, o viés mostra que o comportamento do modelo deve ser acompanhado ao longo do tempo, sobretudo em períodos diferentes daqueles observados durante o treinamento. Do ponto de vista operacional, sua saída pode ser utilizada para comparar teares tecnicamente elegíveis sob uma mesma exposição e apoiar a alocação de composições com base no risco histórico estimado. Trata-se, porém, de uma estimativa preditiva, e não de evidência de que determinada máquina ou composição cause diretamente um número maior de quebras.

Predição temporal de eficiência operacional. As redes LSTM utilizaram duas horas de histórico de telemetria para prever a eficiência média da hora seguinte. No conjunto de teste, o modelo global alcançou R^2 de 0,806 e MAE de 8,71 pontos percentuais. A variante treinada para teares Ratier apresentou R^2 de 0,808 e MAE de 7,89 pontos percentuais, enquanto a variante Jacquard obteve R^2 de 0,794 e MAE de 11,10 pontos percentuais. Os resultados mostram que os três modelos capturaram parcela relevante da variação da eficiência, embora ainda ocorram erros de magnitude operacionalmente importante. As variantes por família não representam o mesmo conjunto de teste e, portanto, seus valores não devem ser interpretados como uma comparação direta de desempenho entre tecnologias. Ainda assim, a análise dos resíduos mostrou maior dificuldade de previsão no subconjunto Jacquard. Também foi observada compressão das previsões nos extremos, com menor fidelidade em situações de eficiência muito baixa ou muito alta. As representações vetoriais das máquinas (*entity embeddings*) permitiram incorporar a identidade de cada equipamento ao aprendizado sem exigir um modelo completamente independente para cada tear. Na prática, a previsão da hora seguinte pode funcionar como um sinal antecipado de mudança no desempenho, auxiliando operadores e preparadores a direcionar sua atenção antes de perdas mais prolongadas de eficiência.

Triagem e risco de defeitos nos rolos. O classificador XGBoost calibrado alcançou ROC-AUC de 0,818 e PR-AUC de 0,448 na identificação de rolos com defeitos moderados ou graves. Com limiar de decisão de 0,162, o modelo apresentou recall de 94,3%, precisão de 42,9% e F1-score de 0,589. O recall elevado indica que a maior parte dos rolos classificados como moderados ou graves foi identificada pelo modelo. Em contrapartida, a precisão de 42,9% mostra que uma parcela relevante dos alertas correspondeu a falsos positivos. Esse comportamento é compatível com o objetivo de utilizar o modelo como mecanismo de triagem, no qual se privilegia a identificação de

possíveis não conformidades para direcionar a inspeção humana. Cabe registrar como limitação metodológica que a seleção desse limiar ocorreu no mesmo conjunto de avaliação para maximizar o F1-score, o que pode conferir um caráter ligeiramente otimista às métricas pontuais de corte (precisão, recall e F1); contudo, os índices ROC-AUC e PR-AUC confirmam a capacidade discriminativa global do classificador de forma independente do limiar operacional.

Materialização do gêmeo digital e governança MLOps. Além dos resultados preditivos, o projeto integrou os modelos a uma arquitetura de microsserviços capaz de organizar o ciclo de dados, treinamento e inferência. O fluxo implementado contempla versionamento de dados e código com DVC e Git, registro de experimentos, métricas e artefatos no MLflow, promoção explícita de versões por meio do alias champion e disponibilização de operações de inferência via API. Essa infraestrutura permitiu superar o isolamento comum de análises baseadas em scripts estáticos, materializando o gêmeo digital como um sistema auditável. A principal contribuição dessa etapa está na garantia da linhagem completa: toda previsão servida pela plataforma pode ser diretamente vinculada à versão exata do modelo, ao experimento registrado e ao conjunto de dados utilizado no treinamento. A consistência dos serviços e a estabilidade de seus contratos foram verificadas por uma suíte de testes automatizados (cobrindo testes unitários, de contratos e de integração ponta a ponta), estabelecendo uma base tecnológica sólida e reprodutível para o ciclo de vida dos modelos.

Implicações práticas e limitações do estudo. Em conjunto, os resultados mostram que as três frentes preditivas fornecem informações complementares para a operação: o modelo de contagem permite estimar o risco histórico de quebras antes do início da produção; a LSTM antecipa a eficiência média em horizonte de uma hora; e o classificador auxilia na priorização de rolos para inspeção. A principal contribuição do DeepMaqTwin está na integração desses sinais em uma estrutura única e rastreável de apoio à decisão, em vez de utilizá-los como análises isoladas.

Os resultados, entretanto, devem ser interpretados dentro das condições em que os dados foram obtidos. A base representa uma única organização e um período histórico específico, de modo que mudanças em máquinas, matérias-primas, fornecedores, manutenção ou mix de produtos podem alterar o comportamento dos modelos. Além disso, variáveis potencialmente relevantes, como condições ambientais e registros mais completos de manutenção, não estavam disponíveis. Os modelos identificam padrões e associações úteis para previsão, mas não estabelecem relações causais entre máquinas, composições e falhas. Como continuidade, são necessários monitoramento de deriva, reavaliação temporal, validação prospectiva com novos lotes e a conexão contínua com os sistemas de chão de fábrica. Essas etapas são importantes para verificar se o desempenho observado se mantém quando a plataforma passa a operar sobre dados futuros e em condições de produção diferentes das utilizadas durante o desenvolvimento.

Conclusão

O DeepMaqTwin demonstrou a viabilidade de integrar dados industriais, modelos preditivos e práticas de MLOps em uma única estrutura de apoio à decisão para o parque de teares. A consolidação de 1.814.677 leituras em 6.488 unidades máquina–dia–composição mostrou que a reconstrução correta da identidade das máquinas, dos registros de produção e das composições é uma etapa fundamental para transformar dados fabris dispersos em uma representação computacional coerente do processo.

Nas três frentes avaliadas, os modelos apresentaram resultados úteis para diferentes momentos da operação. A modelagem de quebras por regressão de contagem permitiu estimar o risco pré-operação considerando a exposição produtiva, com MAE de 4,89 para urdume e 4,94 para trama na validação temporal. As redes LSTM explicaram cerca de 79% a 81% da variação da eficiência da hora seguinte, enquanto o classificador de defeitos alcançou recall de 94,3%, priorizando a identificação de rolos potencialmente não conformes, ainda que com precisão de 42,9%. Em conjunto, esses resultados indicam que os modelos podem apoiar a seleção de máquinas, o monitoramento da eficiência e a priorização de inspeções, desde que suas previsões sejam interpretadas como suporte e não como substituição da decisão humana.

Além da modelagem, o trabalho integrou versionamento de dados e código, registro de experimentos, controle de versões de modelos e inferência por API em uma arquitetura de microsserviços. Essa integração permitiu avançar de análises isoladas para um fluxo rastreável e reproduzível de desenvolvimento e disponibilização dos modelos.

Os resultados devem ser interpretados dentro das condições do estudo. Os dados correspondem a uma única organização e a um período histórico específico, e os modelos identificam associações preditivas, não relações causais. Como continuidade, destacam-se a validação prospectiva com novos lotes, o monitoramento de deriva e calibração, a revisão dos limiares de decisão conforme os custos industriais e a inclusão de variáveis ambientais e de manutenção.

Dentro desses limites, o DeepMaqTwin estabelece uma base tecnológica para o uso de gêmeos digitais preditivos na manufatura têxtil, combinando modelos de aprendizado de máquina, rastreabilidade e integração operacional para apoiar decisões de forma controlada e auditável.

Referências

AZEVEDO, João et al. Predicting Yarn Breaks in Textile Fabrics: A Machine Learning Approach. Procedia Computer Science, v. 207, p. 2301–2310, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.289.

BERGMEIR, Christoph; BENÍTEZ, José M. On the use of cross-validation for time series predictor evaluation. Information Sciences, v. 191, p. 192–213, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.12.028.

CHEN, Tianqi; GUESTRIN, Carlos. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In: ACM SIGKDD INTERNATIONAL CONFERENCE ON KNOWLEDGE DISCOVERY AND DATA MINING, 22., 2016. Proceedings [...]. New York: ACM, 2016. p. 785–794. DOI: https://doi.org/10.1145/2939672.2939785.

ERRANDONEA, Itxaro; BELTRÁN, Sergio; ARRIZABALAGA, Saioa. Digital Twin for maintenance: A literature review. Computers in Industry, v. 123, art. 103316, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316.

HOCHREITER, Sepp; SCHMIDHUBER, Jürgen. Long Short-Term Memory. Neural Computation, v. 9, n. 8, p. 1735–1780, 1997. DOI: https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735.

KREUZBERGER, Dominik; KÜHL, Niklas; HIRSCHL, Sebastian. Machine Learning Operations (MLOps): Overview, Definition, and Architecture. IEEE Access, v. 11, p. 31866–31879, 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3262138.

KRITZINGER, Werner et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

NELDER, J. A.; WEDDERBURN, R. W. M. Generalized Linear Models. Journal of the Royal Statistical Society: Series A, v. 135, n. 3, p. 370–384, 1972. DOI: https://doi.org/10.2307/2344614.

NICULESCU-MIZIL, Alexandru; CARUANA, Rich. Predicting good probabilities with supervised learning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING, 22., 2005. Proceedings [...]. New York: ACM, 2005. p. 625–632. DOI: https://doi.org/10.1145/1102351.1102430.

SUSTO, Gian Antonio et al. Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 11, n. 3, p. 812–820, 2015. DOI: https://doi.org/10.1109/TII.2014.2349359.

TAO, Fei et al. Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. Engineering, v. 5, n. 4, p. 653–661, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014.

YILDIRIM, Pelin; BIRANT, Derya; ALPYILDIZ, Tuba. Data mining and machine learning in textile industry. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, v. 8, n. 1, art. e1228, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/widm.1228.

CÓDIGO: ET1758

AUTOR: JULIO CESAR DE ALMEIDA VIDAL

COAUTOR: HILTON TARGINO BEZERRA

ORIENTADOR: YURI DANIEL JATOBA COSTA

TÍTULO: Análise da técnica de Correlação de Imagem Digital (DIC) na caracterização de deslocamentos e deformações em compósitos de areia com desbastes de pneu

Resumo

O descarte inadequado de pneus inservíveis representa um passivo ambiental relevante da indústria automotiva, o que impulsiona a busca por alternativas sustentáveis de reaproveitamento desse resíduo em aplicações geotécnicas. Este trabalho avaliou a confiabilidade da técnica de Correlação de Imagem Digital (DIC) na caracterização de deslocamentos e deformações em compósitos de areia e desbastes triturados de pneu submetidos a ensaios de compressão, comparando o desempenho de quatro softwares de código aberto: Ncorr, DICe, µDIC e pyDIC. Os ensaios foram conduzidos em caixa de ensaio com face de vidro, utilizando amostras de areia de duna com 0%, 10%, 20% e 40% de desbastes de pneu em massa, com e sem tingimento da superfície, submetidas a compressão cíclica e processadas nos quatro softwares sob parâmetros equivalentes. Os resultados indicaram baixo ruído instrumental, crescimento consistente dos deslocamentos e deformações com o aumento do teor de desbastes, e efeito não sistemático do tingimento, além de boa concordância entre os programas, com coeficientes de variação inferiores a 6%. Conclui-se que os softwares avaliados apresentam desempenho confiável para a caracterização de compósitos solo-borracha, reforçando o potencial do DIC como ferramenta acessível para pesquisas voltadas à valorização sustentável de resíduos de pneu na engenharia geotécnica.

Palavras-chave: Correlação de Imagem Digital. Desbastes.Pneus. Programa computacional.

TITLE: Analysis of the Digital Image Correlation (DIC) Technique for Characterizing Displacements and Strains in Sand-Tire Rubber Composites

Abstract

The improper disposal of end-of-life tires represents a significant environmental liability of the automotive industry, driving the search for sustainable alternatives for reusing this waste in geotechnical applications. This study evaluated the reliability of

the Digital Image Correlation (DIC) technique in characterizing displacements and strains in sand-rubber composites containing shredded tire waste subjected to compression tests, comparing the performance of four open-source software packages: Ncorr, DICe, µDIC, and pyDIC. Tests were conducted in a glass-faced test box using dune sand samples containing 0%, 10%, 20%, and 40% tire waste by mass, with and without surface dyeing, subjected to cyclic compression and processed across the four software packages under equivalent parameters. Results showed low instrumental noise, a consistent increase in displacement and strain magnitudes with rising rubber content, and a non-systematic dyeing effect, along with good agreement among the software packages, with coefficients of variation below 6%. It is concluded that the evaluated software packages perform reliably in characterizing sand-rubber composites, reinforcing the potential of DIC as an accessible tool for research aimed at the sustainable valorization of tire waste in geotechnical engineering.

Keywords: Digital Image Correlation. Shreds Tire. Computer Software.

Introdução

O descarte inadequado de pneus inservíveis representa um dos principais passivos ambientais da indústria automotiva contemporânea. Estima-se que um bilhão de pneus sejam descartados anualmente em todo o mundo, sendo apenas uma pequena parcela reciclada, o que gera riscos ambientais relevantes, como incêndios e descarte irregular (TIP, 2019). Diante desse cenário, a utilização de resíduos de pneu, sob formas variadas como desbastes triturados ou pó de borracha, em aplicações da engenharia civil e geotécnica tem se consolidado como alternativa sustentável de destinação final.

A incorporação de borracha de pneu em matrizes granulares, como areia, altera de forma significativa o comportamento mecânico do compósito resultante, podendo conferir boa absorção de energia plástica e alta resistência a impacto. Estudos prévios já demonstraram que o comportamento tensão-deformação de misturas solo-borracha é fortemente influenciado pelo teor de desbastes de pneu adicionado, com o mecanismo de transferência de tensão migrando de contato partícula-partícula para contato pneu-pneu conforme esse teor aumenta (KIM; SANTAMARINA, 2008).

Compreender a deformação desses compósitos de forma detalhada, entretanto, exige instrumentação capaz de captar campos de deslocamento e deformação de maneira contínua. Nesse contexto, surge a Correlação de Imagem Digital (DIC), uma técnica óptica de ensaio não destrutivo, simples e de custo relativamente baixo, utilizada para medir deformação e deslocamento no plano, baseando-se na análise comparativa entre a imagem inicial e a imagem final da amostra, não medindo diretamente tensão, resistência ou mecanismos de ruptura, mas o movimento aparente da textura no plano da câmera.

Nos últimos anos, diversos pacotes de software gratuitos e de código aberto foram desenvolvidos para tornar essa técnica mais acessível à comunidade científica, cada um com arquitetura e limitações próprias. Enquanto códigos como DICe (desenvolvido pelo Sandia National Labs) são escritos em C++ e oferecem executáveis pré-compilados para Windows, exigindo compilação a partir do código-fonte em ambientes Linux (TURNER, 2015), o µDIC se destaca por ser um código bem documentado e escrito

inteiramente em Python, o que facilita seu uso, mas o torna computacionalmente limitado ao processar imagens de resolução mais elevada (OLUFSEN; ANDERSEN; FAGERHOLT, 2020).

Ferramentas como o Ncorr, por sua vez, dependem do ambiente proprietário MATLAB, o que exige licença paga e representa uma barreira adicional de acessibilidade, ainda que sejam abertas em termos de código (BLABER, 2015). Essa heterogeneidade de linguagens e algoritmos de correlação evidencia a necessidade de investigar se diferentes implementações de DIC produzem resultados consistentes entre si quando aplicadas a um mesmo conjunto de imagens.

A aplicação do DIC não se restringe a materiais homogêneos ou de superfície lisa. Pesquisas já avaliaram a viabilidade do método DIC na caracterização de deformação de materiais empregados na construção rodoviária, incluindo misturas asfálticas, rochas, solo estabilizado com aglomerante hidráulico e geossintéticos (GÓRSZCZYK et al., 2019), tração de elementos de concreto (OLIVEIRA, 2022), identificando vantagens significativas do método frente às técnicas tradicionais.

Apesar da crescente literatura sobre DIC aplicado a solos e materiais granulares, ainda há lacuna relevante quanto à validação metrológica comparativa dessa técnica especificamente para compósitos de areia com desbastes triturados de pneu, material que combina texturas ópticas distintas, potencialmente desafiando de formas diferentes cada algoritmo de correlação.

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo avaliar a confiabilidade da técnica DIC na caracterização de deslocamentos e deformações em compósitos de areia e desbastes triturados de pneu submetidos a ensaio de compressão, comparando o desempenho de quatro softwares de código aberto (Ncorr, DICe, µDIC e pyDIC).

Metodologia

MATERIAIS E PROPORÇÕES ENSAIADAS

Os ensaios foram realizados em uma caixa quadrada de 0,30 × 0,30 × 0,30 m, desenvolvida por uma aluna de mestrado para estudo da resposta do solo de aterro de encontros de pontes integrais sujeitos a movimentos laterais cíclicos (LIMA, 2024). Uma das faces da caixa foi construída em vidro de 20 mm de espessura, permitindo a visualização do modelo e a aplicação das técnicas de correlação de imagem; a face oposta é móvel e realiza movimentos de rotação padronizados por uma engrenagem capazes de induzir deformações no solo ao longo do tempo.

O arranjo experimental conta com uma câmera digital (modelo XX) posicionada perpendicularmente à face frontal transparente da caixa e mantida em posição fixa em todos os ensaios. A iluminação foi provida por dois refletores equipados com softbox, montados em tripés e dispostos o mais próximo possível da caixa para otimizar a qualidade das imagens e minimizar reflexos no vidro.

As amostras estudadas são compostas por um solo arenoso correspondente a uma areia

de duna com adição de desbastes de pneu, provenientes do processo de recapagem de pneus usados, nas proporções de 0%, 10%, 20% e 40% em massa (LIMA, 2024; BEZERRA, 2025). Para avaliar a influência do contraste superficial na qualidade da correlação, adotaram-se duas condições de coloração: na ausência de desbastes (0%), aplicou-se um pigmento preto sobre a superfície do solo, de modo a destacar melhor os grãos de areia entre si; para os teores de 10%, 20% e 40%, utilizou-se uma mistura de solo com desbastes acrescida de areia tingida de branco, na proporção de 1/3 de areia branca para 2/3 de solo natural.

A escolha da coloração branca nos teores com borracha deve-se ao fato de o próprio desbaste de pneu já apresentar cor escura. O uso de um pigmento também escuro tenderia a se confundir visualmente com as partículas de pneu, prejudicando o contraste necessário ao DIC. Essa proporção de tingimento foi definida por não alterar a ficha de caracterização do material, preservando propriedades como a massa específica dos sólidos (LIMA, 2024).

A montagem das amostras consistiu na mistura de areia e desbastes segundo o teor estabelecido, com adição de água correspondente ao teor de umidade ótima do material. A caixa foi preenchida até a altura de 250 mm, em 5 camadas de 5 cm, compactadas com energia de proctor normal, conforme procedimento adotado nos ensaios de caracterização de Lima (2024) e Bezerra (2025), utilizando soquete leve confeccionado em madeira.

O processo de montagem do material consistiu em juntar areia mais desbastes de acordo com a porcentagem estabelecida e água no teor de umidade ótima do material. O caixa foi enchida completando uma altura de 250 mm, sendo este dividido em 5 camadas de 5 cm cada, compactado a energia de compactação proctor normal, com um soquete leve confeccionado de madeira.

AQUISIÇÃO DAS IMAGENS

Com a caixa preenchida, o sistema de iluminação ligado e a câmera acionada, iniciou-se a gravação do ensaio. A parede móvel aplicou rotações oscilatórias alternando fases ativa e passiva por aproximadamente 80 ciclos (sendo cada ciclo o percurso completo de ida e retorno à origem).

Os vídeos foram processados no VLC Player, extraindo-se a imagem de referência (estado inicial indeformado) e os quadros referentes à fase passiva (compressão do solo). As imagens foram salvas em formato TIFF (sem perda de compressão) e editadas para 8 bits, recortando-se apenas a Região de Interesse (ROI). Nos ensaios de calibração (0%, 20% e 40% de borracha), obtiveram-se 40 imagens estáticas por condição; nos ensaios dinâmicos, extraiu-se o número máximo de quadros disponíveis.

PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

O processamento das imagens segue, de forma geral, um fluxo comum a qualquer software de Correlação de Imagem Digital (DIC), independentemente da ferramenta utilizada. Inicialmente, define-se uma imagem de referência, que representa o estado inicial (indeformado) do ensaio e serve de base para o cálculo dos deslocamentos e deformações nas imagens seguintes. Em seguida, seleciona-se a Região de Interesse

(ROI), a área da imagem que efetivamente será analisada, onde para cada ensaio buscou-se selecionar uma região equivalente, correspondente à área do solo submetida à deformação.

Definida a ROI, configuram-se os parâmetros centrais do algoritmo de correlação: o subset radius e o subset spacing. O subset radius define o tamanho (raio, em pixels) de cada pequena região da imagem, chamada de *subset*, usada como unidade de rastreamento entre uma imagem e outra; quanto maior o subset, mais pixels são usados para identificá-lo de forma única, aumentando a robustez da correlação, porém reduzindo a resolução espacial dos resultados.

Já o subset spacing define a distância entre os pontos onde esses subconjuntos são posicionados dentro da ROI, controlando a densidade da malha de pontos analisados. Neste trabalho, adotaram-se quatro pontos de análise por imagem, posicionados de modo a dividir a ROI em quatro quadrantes aproximadamente iguais, com um ponto em cada quadrante.

Em seguida, realiza-se a calibração da imagem, convertendo a escala de pixels para unidades físicas (mm/pixel) e define-se o strain radius (raio de cálculo de deformação), parâmetro que determina o tamanho da vizinhança de pontos ao redor de cada subconjunto utilizada para o cálculo local da deformação.

Para cada imagem processada, obtêm-se os campos completos de deslocamento horizontal (U) e vertical (V), e das componentes de deformação de Green-Lagrange (Exx, Eyy e Exy). Esse fluxo geral foi aplicado nos quatro softwares utilizados neste trabalho, Ncorr, pyDIC, DICe e µDIC, mantendo-se equivalentes os parâmetros de entrada entre eles. As ferramentas, no entanto, diferem na forma de comparação entre imagens, onde no Ncorr todas as imagens da sequência foram comparadas diretamente com uma única imagem de referência fixa, e no pyDIC, µDIC e DICe, adotou-se uma análise incremental adicional.

Resultados e Discussões

Essa seção apresenta e discute os resultados obtidos na campanha de Correlação Digital de Imagens (2D-DIC) reprocessada para sete ensaios de misturas de solo e borracha sob diferentes teores e condições de tingimento. A análise foi estruturada em três níveis fundamentais: a quantificação do ruído metrológico aparente (zero-displacement noise floor); a caracterização dos campos de deslocamento e deformação da campanha deformada; e a consistência interprogramas, totalizando 4 softwares.

Caracterização do ruído do sistema (baseline estático)

Antes da análise da campanha de ensaios deformados, a estabilidade metrológica do arranjo óptico foi verificada por meio de sequências de 40 imagens consecutivas adquiridas sem qualquer deslocamento físico imposto à caixa de ensaio, nos teores de 0%, 20% e 40% de desbastes. Como a amostra permaneceu estática, qualquer deslocamento retornado pelos algoritmos de correlação corresponde exclusivamente ao piso de ruído instrumental do sistema, decorrente de ruído de sensor, pequenas

vibrações, flutuações de iluminação e da própria interpolação de subpixel do solver, aumento da temperatura da câmera, e não a um evento físico real.

Essa caracterização foi conduzida em dois modos de cálculo temporal: no modo acumulado, cada imagem da sequência foi correlacionada diretamente com a primeira fotografia (referência fixa); no modo incremental, cada imagem foi correlacionada apenas com a imediatamente anterior, isolando o ruído de curto intervalo (jitter) do efeito cumulativo de deriva. A calibração da escala física foi realizada individualmente para cada teor a partir da largura conhecida de 14,76 mm da dobradiça metálica da caixa, resultando em fatores de conversão de 0,0709 mm/px (0%), 0,0644 mm/px (20%) e 0,0663 mm/px (40%).

Os resultados mostram uma diferença marcante entre os dois modos de análise. O ruído incremental permaneceu extremamente baixo e estável em todo o intervalo de teores avaliado, com RMS variando entre 0,010 e 0,026 mm, praticamente independente do programa e do tamanho de subset/janela adotado. Já o modo acumulado revelou uma deriva sistemática consideravelmente maior, com RMS entre 0,060 e 0,118 mm, evidenciando um afastamento gradual da posição de referência ao longo da sequência de aquisição, provavelmente associado a variações microclimáticas sutis ou a pequenas deformações térmicas das fixações e do sensor da câmera ao longo do tempo de ensaio.

Para julgar se esse patamar de ruído compromete a leitura dos ensaios efetivos, adotou-se como critério de aceitação que o p95 do ruído estático representasse menos de 5% do deslocamento real mínimo de interesse observado na campanha. Avaliando o cenário mais desfavorável (modo acumulado) para cada teor, o ruído estático p95 correspondeu a aproximadamente 7,6% do deslocamento terminal p95 no solo puro, 4,4% no teor de 20% e 2,7% no teor de 40%, folgadamente abaixo do limite de 10% em todas as condições, validando a capacidade do arranjo óptico para medir com confiabilidade as magnitudes de deformação impostas nos ensaios principais. A análise de sensibilidade do subset no DICe (31 a 61 px) reforça essa conclusão: o RMS acumulado oscilou de forma marginal, entre 0,0609 e 0,0611 mm, indicando robustez da correlação local à parametrização espacial adotada.

Vale registrar que os valores máximos absolutos observados nas séries de calibração, como um pico isolado de 4,98 mm no modo incremental do µDIC em 0%, destoam fortemente de seus respectivos p95 e RMS, sendo interpretados como outliers decorrentes de flutuações ópticas ou perda pontual de rastreamento, e não como representativos do erro sistemático típico do sistema.

Deslocamentos resultantes da campanha deformada

A campanha de ensaios deformados reúne as sete misturas estudadas, reprocessadas em 56 combinações de parâmetros espaciais nos três programas de correlação (DICe, pyDIC e µDIC). Como arranjo primário de síntese quantitativa, adotou-se o DICe com função de forma Affine e subset de 41 px no último quadro válido de cada sequência, por oferecer cobertura espacial completa nos sete ensaios e estimar, de forma acoplada, tanto o campo de deslocamento quanto os gradientes locais de deformação no mesmo processo de solução.

Os dados evidenciam o crescimento consistente da magnitude de deslocamento com o aumento do teor de desbastes, comportamento coerente com o esperado: quanto maior a fração de partículas de borracha incorporada, maior a capacidade de deformação elástica do compósito. O ensaio de 20% tingido concentrou a maior escala robusta de deslocamento de toda a campanha, com |U| p95 de 2,683 mm, ao passo que o maior valor absoluto (hotspot isolado) foi registrado no ensaio de 40% não tingido, com |U| máximo de 5,215 mm. Em relação ao solo puro, o deslocamento robusto p95 foi ampliado em aproximadamente 276% no ensaio de 40% não tingido e 281% no correspondente tingido, dimensionando o impacto expressivo do acréscimo de borracha sobre a flexibilidade óptica da mistura.

Esse contraste entre os dois ensaios de maior magnitude, 20% tingido concentrando a maior cauda robusta (p95) e 40% não tingido concentrando a maior extrema local (máximo), ilustra uma distinção metodológica importante para a leitura destes resultados.

O percentil 95 resume o comportamento físico da região de interesse como um todo, pouco sensível a pontos isolados; já o valor máximo absoluto responde a um único pico do campo, podendo refletir tanto um fenômeno físico real e localizado, como a concentração de deformação junto à interface entre a matriz de solo e uma partícula volumosa de borracha, quanto um artefato de correlação. Por isso, o ensaio de 40% não tingido foi adicionalmente inspecionado por meio de seu campo vetorial de deslocamento, que confirma a concentração física do hotspot na região superior das camadas de solo, próxima à parede da caixa, área reconhecida como preferencial de deformação dado o arranjo das propriedades do material.

A evolução temporal dos deslocamentos ao longo da sequência de quadros também foi avaliada quanto à estabilização. Em todos os sete ensaios, a cauda estatística de deslocamento atingiu um regime assintótico uniforme, com início mapeado entre 80% e 81% do progresso da sequência de imagens e coeficiente de variação (CV) terminal inferior a 2% no arranjo primário de processamento, indicando que os campos de deslocamento reportados no quadro final são representativos de um estado já estabilizado do ensaio, e não de um processo ainda em transição.

As duas figuras acima, obtidas de forma independente no DICe e no Ncorr, apresentam o mesmo padrão qualitativo de hierarquia entre os sete ensaios e a mesma forma de curva, crescimento acentuado nos quadros iniciais seguido de estabilização progressiva, reforçando a consistência física do fenômeno capturado por ambos os programas.

CAMPOS DE DEFORMAÇÃO E CISALHAMENTO

As grandezas de deformação local, componentes normais no plano da câmera (ε_{xx}, ε_{yy}), cisalhamento de engenharia (γ_{xy}) e o cisalhamento principal máximo ($\gamma_{max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$) — foram obtidas no modelo Affine por diferenciação numérica do campo de deslocamento, e são apresentadas na forma de estatística de cauda robusta (p95), em grandeza adimensional multiplicada por 10^{-3}.

O padrão observado nos deslocamentos se repete nas deformações: o ensaio de 40% não tingido concentrou a maior cauda de distorção cisalhante de toda a campanha, com γ_{max} p95 de $37{,}821 \times 10^{-3}$ (equivalente a aproximadamente 3,78% de cisalhamento

principal), o mesmo ensaio que já havia registrado o maior deslocamento local absoluto. Essa correlação direta sinaliza a formação de faixas de gradiente de deformação severo na interface entre a matriz de solo e as partículas volumosas de borracha, coerente com a maior heterogeneidade mecânica esperada nesse teor.

Para complementar a leitura por estatística de cauda, a evolução das medianas de εxx e εyy ao longo de toda a sequência de quadros foi acompanhada de forma independente no Ncorr para os sete ensaios. As curvas de deformação horizontal mediana mostram, de forma consistente, valores negativos (compressão) que se intensificam com o teor de desbastes, com a condição de 40% não tingido atingindo a maior magnitude entre todas — comportamento compatível com o adensamento progressivo da matriz granular sob a ação do carregamento. Já as curvas de deformação vertical mediana mostram crescimento positivo (tração/extensão) com magnitude também crescente com o teor de borracha, refletindo a maior compressibilidade vertical do compósito à medida que mais partículas de borracha — mais deformáveis que os grãos de areia — são incorporadas à mistura.

EFEITO DO TINGIMENTO NAS MISTURAS

Uma das questões centrais deste trabalho foi avaliar se o reforço de contraste por tingimento altera de forma sistemática a magnitude de deslocamento e deformação capturada pela correlação. A comparação pareada entre amostras tingidas e não tingidas de mesmo teor revela que esse efeito não é monotônico, depende do teor de borracha e da estatística espacial avaliada, o que impede a formulação de uma regra universal do tipo "o tingimento sempre amplia (ou sempre reduz) a resposta medida".

Nos teores de 10% e 20%, a amostra tingida apresentou deslocamentos robustos consistentemente superiores à correspondente não tingida em praticamente todas as faixas do campo, com destaque para o teor de 20%, no qual o deslocamento robusto p95 foi ampliado em 87,7% pelo tingimento (de 1,429 mm para 2,683 mm). Já no teor limite de 40%, essa tendência se inverte parcialmente: o deslocamento robusto médio permaneceu estatisticamente equivalente entre as duas condições (variação marginal de cerca de 1,5%), mas o ensaio tingido apresentou redução tanto do hotspot de deslocamento máximo (−12,5%, de 5,215 mm para 4,559 mm) quanto do cisalhamento máximo de cauda (γmax p95 caindo de $37{,}821\times10^{-3}$ para $30{,}530\times10^{-3}$).

Uma hipótese plausível é que, em teores mais elevados de desbastes, o contraste óptico adicional do tingimento altera a densidade local de gradientes de cinza da superfície, estabilizando a convergência do solver e atenuando picos anômalos, sem alterar de forma expressiva a magnitude física média do campo de deslocamento. Esse achado converge com a observação, já discutida na metodologia, de que a proporção fixa de tingimento (1/3) não atua da mesma forma em todos os teores, tornando-se proporcionalmente menos eficaz à medida que a fração de borracha aumenta.

CONSISTÊNCIA ENTRE PROGRAMAS DE CORRELAÇÃO

Para verificar a robustez das estimativas físicas frente a diferentes formulações de solver, a campanha foi processada de forma independente em três programas com abordagens distintas: o DICe (Sandia National Labs), de correlação local com critério ZNSSD e funções de forma Translation e Affine; o pyDIC, implementação local em

Python apoiada em rotinas de rastreamento de grade e fluxo óptico da biblioteca OpenCV; e o µDIC, de formulação global baseada em discretização por elementos quadrilaterais de quatro nós (Q4).

O indicador adotado para verificar a proximidade de escala entre os solvers foi o coeficiente de variação (CV) do |U| p95 entre as oito configurações paramétricas disponíveis em cada ensaio. Os resultados indicam excelente concordância operacional: CV de 5,98% no solo puro (amplitude de 0,580 a 0,696 mm), 2,38% no ensaio de 10% não tingido (0,605–0,654 mm), 2,97% em 20% tingido (2,486–2,760 mm), 4,36% em 40% não tingido (2,198–2,515 mm) e 3,22% em 40% tingido (2,329–2,559 mm). Dispersões dessa magnitude, onde todas são inferiores a 6%, confirmam que a estimativa da cauda de deslocamento robusto opera na mesma ordem de grandeza física independentemente da biblioteca de processamento e da discretização espacial adotada (subsets de 31 a 61 px no DICe, janelas de 40 a 80 px no pyDIC, ou malha Q4 no µDIC).

Essa consistência, porém, não se estende igualmente às extremas espaciais nem às deformações derivadas. No ensaio de 20% não tingido, o pyDIC com janela de 60 px reportou um deslocamento máximo absoluto de 29,419 mm, claramente anômalo frente ao seu próprio p95 (1,454 mm) e aos máximos coerentes em torno de 2,7 mm indicados pelos demais programas, evidenciando falha localizada de rastreamento sob gradiente de textura complexo e reforçando o risco de reportar máximos brutos isolados sem prévia auditoria espacial do campo.

As deformações derivadas também se mostraram sensíveis à formulação de cálculo de gradiente: no ensaio de 20% tingido, o γmax p95 variou de $6{,}275\times10^{-3}$ no pyDIC a $26{,}662\times10^{-3}$ no DICe e $28{,}815\times10^{-3}$ no µDIC, o pyDIC calcula gradientes simples sobre grade mais espaçada, o DICe estima gradientes refinados por funções de forma Affine, e o µDIC deriva as deformações de funções de forma de elementos finitos Q4 sobre nós interpolados.

COMPARAÇÃO EXTERNA COM O NCORR

Como controle de validação metrológica externa, as componentes terminais de deslocamento do arranjo primário (DICe Affine 41 px) foram confrontadas com os resultados gerados de forma independente pelo Ncorr, software acadêmico baseado em MATLAB que emprega formulação distinta de correlação (RG-DIC) e reporta deformações no tensor de Green-Lagrange.

A diferença absoluta entre as medianas espaciais de deslocamento horizontal e vertical estimadas pelos dois programas permaneceu, na maioria dos ensaios, na escala micrométrica (10^{-3} a 10^{-2} mm): 0,0004 mm (U) e 0,0065 mm (V) em 10% não tingido; 0,0036 mm e 0,0010 mm em 10% tingido; 0,0012 mm e 0,0018 mm em 20% não tingido; 0,0028 mm e 0,0047 mm em 40% não tingido; 0,0030 mm e 0,0148 mm em 40% tingido. Desvios ligeiramente superiores apareceram no solo puro (0,0817 mm e 0,0857 mm) e no componente horizontal de 20% tingido (0,0758 mm), atribuídos a pequenas discrepâncias no enquadramento geométrico da ROI ou na orientação do vetor de escala entre os dois processamentos. Esse confronto confirma coerência nominal muito forte entre DICe e Ncorr, reforçando a confiabilidade física do arranjo primário adotado.

O mesmo grau de confiança não pode, contudo, ser estendido diretamente às deformações: o Ncorr reporta o tensor de Green-Lagrange em escala percentual, enquanto o DICe e os demais solvers utilizam gradientes diretos em grandeza adimensional $\times 10^{-3}$. Essa diferença de formulação, somada a diferenças no raio de cálculo do gradiente, na malha de amostragem e nos critérios de exclusão periférica da ROI, impede uma comparação quantitativa direta de campo completo entre as duas abordagens. A validação cruzada aqui realizada é, portanto, qualitativa e exploratória: avalia consistência de tendência espacial e de magnitude relativa, não uma equivalência metrológica formal.

Essa convergência de resultados, tanto na magnitude das medianas de deslocamento quanto, qualitativamente, na localização espacial das regiões de maior deformação identificadas pelos campos vetoriais do DICe e pelas plumas de cor do Ncorr, reforça que o método de DIC empregado foi capaz de capturar, de forma consistente entre diferentes implementações, a interação física entre a matriz de solo e os desbastes de pneu ao longo de todo o intervalo de teores avaliado.

Conclusão

O presente trabalho avaliou a confiabilidade da técnica de Correlação de Imagem Digital (DIC) na caracterização de deslocamentos e deformações em compósitos de areia e desbastes triturados de pneu sob compressão, comparando quatro softwares de código aberto (Ncorr, DICe, µDIC e pyDIC). A investigação partiu do problema ambiental do descarte de pneus inservíveis e da lacuna de validação do DIC para esse tipo de compósito, cuja heterogeneidade textural desafia de forma distinta cada algoritmo de correlação. Metodologicamente, ensaios de compressão cíclica foram conduzidos em caixa de ensaio com face de vidro, em amostras de areia de duna com 0%, 10%, 20% e 40% de desbastes de pneu, com e sem tingimento, processadas nos quatro softwares sob parâmetros de entrada equivalentes (subset radius, subset spacing e strain radius).

Os resultados mostraram que o aumento do subset/janela produziu valores de deslocamento e deformação próximos, porém sistematicamente inferiores, indicando estabilidade da correlação frente à discretização espacial adotada. Observou-se também crescimento consistente dos deslocamento e deformação com o aumento do teor de desbastes, coerente com a maior deformabilidade elástica conferida ao compósito pela incorporação de borracha, ressalvados alguns outliers pontuais associados a falhas localizadas de rastreamento ou a concentrações reais de deformação na interface solo-borracha.

Quanto ao efeito do tingimento, este não se mostrou sistemático. Nos teores de 10% e 20%, o tingimento ampliou os valores medidos em relação às amostras não tingidas, enquanto no teor de 40% houve redução dos valores na condição tingida. Esse comportamento sugere perda de eficácia proporcional do tingimento fixo (1/3) em teores mais elevados de borracha, dada a competição óptica entre o pigmento aplicado e a coloração escura intrínseca da borracha, apontando para a necessidade de estudos

futuros sobre o ajuste da proporção de tingimento em função do teor de desbastes.

As calibrações estáticas apresentaram valores baixos, compatíveis com o piso de ruído instrumental do sistema, embora sujeitos a variações decorrentes da temperatura da câmera e do ambiente, bem como da estabilidade da iluminação incidente sobre a amostra. Como limitações do trabalho, destacam-se a ausência de repetições suficientes para testar a reprodutibilidade das respostas entre os softwares, a não exploração de outras cores de tingimento e a falta de medição externa de referência capaz de hierarquizar os softwares quanto à proximidade com a deformação real do material.

Os quatro softwares avaliados apresentaram desempenho consistente entre si, o que valida o uso de ferramentas gratuitas e de código aberto como alternativa viável a soluções proprietárias no estudo de compósitos solo-borracha. Dessa forma, os resultados obtidos são considerados satisfatórios e reforçam a relevância da pesquisa para a valorização sustentável de resíduos de pneu na engenharia geotécnica.

Referências

GÓRSZCZYK, J.; MALICKI, K.; ZYCH, T. Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. Materials, v. 12, n. 15, 2349, 2019. DOI: 10.3390/ma12152349.

LIMA, A. C. L. Desenvolvimento de equipamento laboratorial para estudo da resposta do solo de aterro de encontros de pontes integrais sujeitos a movimentos laterais. cíclicos. Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em engenharia civil e ambiental - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2024.

BEZERRA, H. T. Modelos laboratoriais de encontro de ponte integral com aterro com resíduos de pneus triturados. 2025. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia civil e Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.

NASCIMENTO, P.R. Capacidade de carga de misturas de solo laterítico e desbastes de pneus. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015

ALI, M. B., AB GHANI, A. F., DHARMALINGAM, S., & Mahmud, J. (2020). Digital Image Correlation (DIC) Technique in Measuring Strain using Opensource Platform Ncorr. Journal of Advanced Research in Applied Mechanics, 26(1), 10–21. Retrieved from https://www.akademiabaru.com/submit/index.php/aram/article/view/1766

S. A. SHIFANI. Experimental Validation of Finite Element Models Using Digital Image Correlation Strain Data. Tenth International Conference on Science Technology Engineering and Mathematics (ICONSTEM), Chennai, India, 2025, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICONSTEM65670.2025.11374821.

PAN, B.; QIAN, K.; XIE, H.; ASUNDI, A.. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. Measurement Science and Technology, v. 20, n. 6, p. 062001, 2009. DOI: 10.1088/0957-0233/20/6/062001.

BELLONI, V.; RAVANELLI, R.; NASCETTI, A.; DI RITA, M.; MATTEI, D.; CRESPI, M. py2DIC: a new free and open source software for displacement and strain measurements in the field of experimental mechanics. Sensors, v. 19, n. 18, p. 3832, 2019. DOI: 10.3390/s19183832.

WANG, C.; DENG, A.; TAHERI, A. Three-dimensional discrete element modeling of direct shear test for granular rubber–sand. Computers and Geotechnics, v. 97, p. 204–216, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.01.014.

BLABER, J.; ADAIR, B.; ANTONIOU, A. Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. Experimental Mechanics, v. 55, n. 6, p. 1105–1122, 2015. DOI: 10.1007/s11340-015-0009-1. https://link.springer.com/article/10.1007/s11340-015-0009-1

KIM, H.-K.; SANTAMARINA, J. C. Sand–rubber mixtures (large rubber chips). Canadian Geotechnical Journal, v. 45, n. 10, p. 1457–1466, 2008. DOI: 10.1139/T08-070. https://cdnsciencepub.com/doi/abs/10.1139/T08-070

OLUFSEN, S. N.; ANDERSEN, M. E.; FAGERHOLT, E. µDIC: An open-source toolkit for digital image correlation. SoftwareX, v. 11, p. 100391, 2020. DOI: 10.1016/j.softx.2019.100391.

TURNER, D. Z. Digital Image Correlation Engine (DICe) Reference Manual. Sandia Report SAND2015-10606 O. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2015. Disponível em: https://dicengine.github.io/dice/

TIRE INDUSTRY PROJECT (TIP). End-of-Life Tire Management: Data Report. World

Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 2019. Disponível em: https://docs.wbcsd.org/2018/02/TIP/End_of_Life_Tires-Full-Report.pdf

OLUFSEN, Sindre Nordmark; ANDERSEN, Marius Endre; FAGERHOLT, Egil. µDIC: an open-source toolkit for digital image correlation. SoftwareX, v. 11, p. 100391, 2020. DOI: 10.1016/j.softx.2019.100391.

OLIVEIRA, Kaio Cézar da Silva. Aplicação da Correlação de Imagens Digitais na Avaliação do Comportamento à Tração de Elementos de Concreto. 2022. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022. URI: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/240909

CÓDIGO: ET1763

AUTOR: ANA CLARA MENESES DE ARAUJO

ORIENTADOR: ADILSON JOSÉ DE OLIVEIRA

TÍTULO: Desenvolvimento de um sistema de manipulação de objetos baseado em ventosas para um manipulador robótico

Resumo

A automação industrial tem ampliado a utilização de manipuladores robóticos em atividades que exigem exatidão, repetibilidade e segurança operacional. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de manipulação por ventosas para integração a um manipulador robótico, destinado ao manuseio e posicionamento de objetos com espessuras reduzidas (< 2 mm). A preensão por sucção possibilita a fixação e o transporte dos objetos sem a aplicação direta de esforços mecânicos sobre suas superfícies. O desenvolvimento foi realizado no Laboratório de Manufatura (LABMAN), do Departamento de Engenharia Mecânica, em colaboração com o Laboratório de Automação e Robótica (LAR), da Escola de Ciências e Tecnologia (ECT), ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). A metodologia contemplou a fundamentação teórica, definição dos requisitos, seleção e dimensionamento dos componentes, projeto mecânico, manufatura da estrutura com o auxílio de impressora 3D, implementação do sistema de controle, integração dos subsistemas mecânico, pneumático e eletrônico e montagem do protótipo. Como principal resultado, foi desenvolvido um sistema de preensão modular por ventosas, com possibilidade de reconfiguração conforme a geometria dos objetos. Os testes experimentais demonstraram o funcionamento do sistema na fixação e movimentação das peças, permitindo avaliar sua aderência, capacidade de movimentação, repetibilidade e segurança operacional.

Palavras-chave: Automação industrial. Robótica. Manufatura aditiva. Sucção pneumática.

TITLE: DEVELOPMENT OF A SUCTION CUP-BASED OBJECT MANIPULATION SYSTEM FOR A ROBOTIC MANIPULATOR

Abstract

Industrial automation has expanded the use of robotic manipulators in activities that require accuracy, repeatability, and operational safety. In this context, this work presents the development of a suction-cup-based manipulation system for integration with a robotic manipulator, intended for handling and positioning objects with reduced thickness (< 2 mm). Suction-based gripping enables the fixation and transportation of objects without the direct application of mechanical forces to their surfaces. The development was carried out at the Manufacturing Laboratory (NTI), Department of Mechanical Engineering, in collaboration with the Automation and Robotics Laboratory (LAR), School of Science and Technology, both at the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN). The methodology included a theoretical foundation, definition of requirements, selection and sizing of components, mechanical design, manufacturing of the structure using 3D printing, implementation of the control system, integration of the mechanical, pneumatic, and electronic subsystems, and prototype assembly. As the main result, a modular suction-cup-based gripping system was developed, allowing reconfiguration according to the geometry of the objects. Experimental tests demonstrated the system's functionality in fixing and moving the parts, enabling the evaluation of its adhesion, handling capacity, repeatability, and operational safety.

Keywords: Industrial Automation. Robotics. Additive Manufacturing. Pneumatic Suc

Introdução

A indústria moderna atravessa uma transformação impulsionada pela automação industrial, que integra tecnologias avançadas, inteligência artificial e conectividade para otimizar processos e permitir a tomada de decisões autônomas. Nesse cenário, o robô industrial destaca-se como um manipulador reprogramável e multipropósito, essencial para tarefas de montagem e movimentação de componentes com exatidão e repetibilidade. De acordo com Groover (2015), a automatização dos processos de manuseio contribui para o aumento da produtividade e da qualidade em linhas de produção.

Contudo, a eficácia desse sistema depende também do seu efetuador final (ou garra), responsável pela interface direta entre o robô e o meio ambiente e pelo manuseio físico dos componentes. Segundo Gouvêa (1993), a maioria dos robôs industriais não vem equipada com garras do fabricante, cabendo ao usuário selecionar ou desenvolver o dispositivo adequado para cada aplicação. O autor classifica os sistemas de preensão em três categorias: ação unilateral, que interage com uma face do objeto, como garras de sucção, magnéticas e adesivas; ação bilateral, que utiliza, no mínimo, dois dedos rígidos em movimento de pinça; e ação multilateral, que busca envolver ou amoldar-se à geometria da peça.

Apesar da diversidade de tecnologias, a engenharia de garras enfrenta limitações, pois cada sistema possui uma faixa específica de aplicação. Conforme Gouvêa (1993), a

manipulação pode ser comprometida pela fragilidade e resistência das peças, propriedades do material, geometria complexa, estado superficial e contaminação, além de temperaturas extremas. Esses fatores podem causar danos ou deformações, dificultar o assentamento e posicionamento, reduzir o atrito ou comprometer componentes elásticos.

Nesse contexto, estudos demonstram a aplicação de ventosas em manipuladores robóticos. Fiegenbaum et al. (2016) desenvolveram um efetuador final do tipo ventosa para operações de pick-and-place, utilizando geração de vácuo por dispositivos Venturi ou bombas de vácuo e uma ventosa do tipo fole para diferentes peças com superfícies lisas. Os testes demonstraram a capacidade de manipulação e posicionamento das peças. Gennari et al. (2024) utilizaram uma ventosa em um braço robótico para identificação e organização automática de peças, integrando-a aos sensores e ao sistema de controle para reconhecimento, coleta e posicionamento dos objetos.

Diante desse cenário, o avanço da automação industrial reforça a necessidade de efetuadores finais capazes de realizar a interação entre máquina e componente de forma eficiente, atendendo às demandas por flexibilidade, produtividade e confiabilidade. Assim, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de sucção por ventosas destinado à integração em um manipulador robótico para operações de pick-and-place (pega e posiciona), buscando mostrar a aplicabilidade da preensão a vácuo na manipulação automatizada de componentes.

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver e implementar um sistema de manipulação baseado em ventosa, para ser montado em um manipulador robótico (existente no Laboratório de Manufatura) e capaz de realizar a fixação e o transporte de objetos, demonstrando sua aplicabilidade em processos industriais automatizados. Visando ao alcance do objetivo geral, foram definidos os objetivos específicos apresentados a seguir:

a) realizar uma fundamentação teórica sobre princípios de utilização de ventosas industriais e sistemas de manipulação;

b) selecionar e dimensionar ventosas, bombas de vácuo, tubulações e elementos mecânicos necessários;

c) projetar e manufaturar a estrutura de suporte para o sistema de ventosa;

d) definir e programar um módulo de controle para as operações de aspiração, movimentação e soltura;

f) integrar os componentes mecânicos, pneumáticos e eletrônicos em um protótipo funcional;

f) testar o sistema quanto à eficiência de aderência, capacidade de carga, repetibilidade e segurança operacional.

Metodologia

Na Figura 1 é apresentado o fluxograma das etapas necessárias para o desenvolvimento do sistema de manipulação por ventosas. O projeto tem como objetivo desenvolver um sistema de preensão baseado em ventosas para ser integrado a um manipulador robótico, possibilitando a fixação e o transporte de objetos. O projeto foi realizado no Laboratório de Manufatura (localizado no Núcleo de Tecnologia Industrial, NTI), do Departamento de Engenharia Mecânica, em colaboração com o Laboratório de Automação e Robótica (LAR), da Escola de Ciências e Tecnologia, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Inicialmente, foi realizada uma fundamentação teórica sobre os princípios de utilização de ventosas industriais e dos sistemas de manipulação. A partir dessa etapa, foram definidos os requisitos do sistema, selecionados e dimensionados os componentes e estabelecidas as atividades necessárias para a construção e integração do protótipo.

O projeto do sistema foi desenvolvido no software CAx Creo Parametric 11.0.1.0 , sendo inicialmente elaborados os componentes de forma individual e, posteriormente, realizada a montagem. A impressão dos componentes da garra serão feitos em uma impressora 3D Creality K1 Max, com filamento ABS rosa da 3DLAB. Para a fabricação das peças, os seguintes parâmetros devem ser seguidos: temperatura de 260 °C no bico extrusor e 110 °C na mesa de impressão, condições definidas para o processamento do material.

As peças foram produzidas com 20% de preenchimento interno, utilizando o padrão Giroide, e três camadas de perímetro, buscando proporcionar resistência e estabilidade aos componentes. Quanto às velocidades de impressão, foram adotados os valores de 200 mm/s para a parede externa, 300 mm/s para a parede interna, 270 mm/s para o preenchimento interno, 250 mm/s para o preenchimento sólido interno e 200 mm/s para a superfície superior. Para pequenos perímetros, foi utilizada uma redução para 50% da velocidade, além da função de desaceleração para saliências.

Para a realização do projeto, foram estabelecidos alguns requisitos necessários para garantir o funcionamento adequado do sistema. A seguir, são apresentados os requisitos definidos para o desenvolvimento do projeto.

a) Ter capacidade de elevar uma massa de 200 g;

b) Ser um sistema modular, de forma permitir a se adequar às formas de produtos manipulados;

c) Permitir a integração com o sistema de controle do manipulador;

d) Realizar a fixação dos objetos por meio de sucção a vácuo;

e) Possibilitar a alteração da quantidade e da disposição das ventosas;

f) Apresentar estabilidade durante a movimentação, evitando o deslocamento dos módulos;

g) Possibilitar a realização das operações de movimentação e posicionamento dos objetos, de acordo com a aplicação proposta para o manipulador robótico.

Para atender aos requisitos estabelecidos para o projeto, foi necessário considerar diferentes aspectos relacionados à capacidade, funcionalidade e adaptação do sistema. De acordo com o requisito a) o sistema de sucção por ventosas foi desenvolvido considerando a capacidade de manipular peças com massa de até 200 g. O requisito b) estabeleceu a necessidade de uma estrutura modular, como por exemplo uma geometria inspirada em uma colmeia, permitindo alterar a configuração da garra conforme a geometria da peça. O requisito c) refere-se à integração do sistema ao manipulador robótico, possibilitando a combinação dos movimentos do robô com o acionamento do sistema de sucção.

Para atender ao requisito d) a preensão foi realizada por meio de ventosas planas de silicone e de um sistema de vácuo, responsável pela fixação das peças durante a manipulação. O requisito e) está relacionado à possibilidade de adaptação da configuração da garra, sendo possível modificar a quantidade e a disposição das ventosas de acordo com a superfície e a geometria do objeto. Para atender ao requisito f) deve-se restringir o deslocamento dos módulos, de modo a proporcionar maior estabilidade ao conjunto. Por fim, o requisito g) está relacionado à integração entre o manipulador e o sistema de sucção, possibilitando a realização das etapas de fixação, movimentação e posicionamento das peças.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos durante o desenvolvimento do projeto foram organizados a partir das etapas de definição da configuração, fabricação, montagem, integração e testes do sistema de manipulação. A partir dos requisitos estabelecidos anteriormente, foram selecionados os componentes e definida a configuração mecânica, pneumática e de controle do sistema.

Em atendimento ao requisito de preensão das peças, foram utilizadas ventosas planas de silicone, com dimensões de 10 × 7 × 6 mm (base × altura × furo). As ventosas constituem o elemento de contato entre a garra e a peça, sendo responsáveis pela fixação por meio da sucção gerada pelo sistema de vácuo.

Em relação ao requisito de seleção dos componentes necessários ao funcionamento do sistema de sucção, o sistema de geração de vácuo foi composto por uma mini bomba de vácuo de diafragma, com alimentação de 24 V em corrente contínua e corrente nominal de 260 mA. Inicialmente, havia sido prevista a utilização de uma válvula solenóide para o controle do circuito, entretanto, durante o desenvolvimento e a realização dos testes, essa configuração foi modificada e a válvula solenóide deixou de ser utilizada. Dessa forma, optou-se por uma ligação direta entre a bomba e o sistema de sucção, simplificando a montagem e concentrando a geração do vácuo diretamente na bomba.

Ainda em atendimento ao requisito relacionado à seleção e utilização dos componentes necessários ao funcionamento do sistema de sucção, foram utilizadas conexões pneumáticas do tipo união em T, responsáveis pela interligação e distribuição do fluxo de ar entre os pontos do circuito de sucção. A ligação entre os componentes foi realizada por meio de mangueira de silicone, formando o circuito responsável pela condução do vácuo até as ventosas. Com a retirada da válvula solenóide, o sistema passou a apresentar uma configuração pneumática mais direta, reduzindo a quantidade de componentes intermediários entre a bomba e as ventosas. Os equipamentos utilizados no sistema de acionamento são apresentados na Figura 3, presente nos anexos.

Em atendimento ao requisito de modularidade, foi desenvolvida uma estrutura com geometria semelhante a uma colmeia, composta por módulos que podem ser encaixados, removidos e reposicionados. Essa configuração permite modificar a disposição dos pontos de sucção conforme a geometria e as dimensões da peça a ser manipulada. Dessa maneira, a quantidade e a posição das ventosas podem ser ajustadas de acordo com a superfície disponível para a preensão, mantendo a característica de reconfiguração proposta para a garra.

Durante o desenvolvimento da estrutura modular, foi inicialmente considerada uma conexão do tipo rabo de andorinha para realizar o acoplamento entre os módulos. Entretanto, a análise da montagem indicou a possibilidade de deslocamento dos módulos durante a aplicação da sucção. Como resultado dessa avaliação, a configuração foi modificada para um sistema de conexão semelhante a um trilho, no qual os módulos permanecem encaixados e têm seu deslocamento restringido. Essa alteração permitiu manter a característica modular da estrutura e, ao mesmo tempo, proporcionar maior estabilidade ao conjunto durante a operação, atendendo ao requisito relacionado à estabilidade e à restrição do deslocamento dos módulos.

Após a definição da geometria e da configuração final da estrutura, os componentes foram fabricados por manufatura aditiva, utilizando impressão 3D. A fabricação permitiu produzir a estrutura modular e, posteriormente, realizar a montagem dos componentes mecânicos e pneumáticos. A estrutura obtida pode ser observada na Figura 2, na qual é apresentado o conjunto desenvolvido após a fabricação e montagem, atendendo ao requisito referente ao projeto e à fabricação da estrutura de suporte do sistema de ventosas.

Em seguida, a fabricação e montagem da estrutura, foram integrados os subsistemas mecânico, pneumático e eletrônico ao manipulador robótico. Essa etapa atende aos requisitos relacionados à integração dos componentes do sistema e ao controle do sistema de sucção, a integração possibilitou utilizar a garra como elemento de extremidade do manipulador, permitindo que o movimento da estrutura fosse realizado pelo robô enquanto o sistema de sucção realizava a fixação da peça. O controle da bomba foi realizado por meio de um Raspberry Pi, utilizado para realizar o acionamento no modo liga/desliga (ON/OFF). Dessa forma, o controle eletrônico permitiu determinar os momentos de acionamento e interrupção da bomba durante os testes.

Em atendimento ao requisito relacionado à capacidade de realizar as etapas de fixação, movimentação e posicionamento das peças, a dinâmica de funcionamento do sistema foi estabelecida a partir da aproximação da garra à peça, seguida pelo acionamento da

bomba para geração do vácuo. Com a sucção estabelecida, as ventosas realizam a fixação da peça, permitindo que o manipulador robótico realize sua elevação e transporte. Após o deslocamento até a posição determinada, a interrupção do acionamento da bomba encerra a geração do vácuo, possibilitando a liberação da peça. Assim, o conjunto permite reproduzir uma sequência de aproximação, sucção, preensão, elevação, transporte, posicionamento e liberação do objeto.

Para verificar o funcionamento do sistema de sucção, foram realizados testes experimentais utilizando uma chapa de acrílico com dimensões de 100 × 100 mm e massa de 18,075 g, posicionada na região destinada à aplicação do vácuo. Durante o ensaio, a chapa foi colocada em contato com as ventosas e, posteriormente, a bomba foi acionada por meio do Raspberry Pi. A geração do vácuo possibilitou a sucção da peça, permitindo observar o comportamento do sistema durante a aplicação da preensão e verificar a integração entre os componentes responsáveis pela geração e aplicação do vácuo.

Os testes permitiram observar a resposta do sistema ao acionamento da bomba e demonstrar, de forma prática, a aplicação do princípio de preensão por sucção. A configuração com ligação direta entre a bomba e o sistema de sucção apresentou uma montagem simplificada, uma vez que a geração do vácuo ocorre diretamente pela bomba, sem a utilização da válvula solenóide inicialmente prevista. O acionamento por meio do Raspberry Pi possibilitou controlar o funcionamento da bomba de forma simples, estabelecendo uma dinâmica de operação adequada aos testes realizados.

Além do funcionamento do sistema de sucção, a configuração modular desenvolvida possibilitou avaliar a capacidade de adaptação da garra. A possibilidade de remover e reposicionar os módulos permite alterar a disposição das ventosas conforme a geometria da peça. O sistema de conexão semelhante a um trilho contribui para manter os módulos posicionados durante a operação, evitando deslocamentos indesejados e proporcionando maior estabilidade à estrutura. Esses resultados demonstram o atendimento aos requisitos relacionados à modularidade e à estabilidade da estrutura.

De maneira geral, os resultados obtidos demonstraram a integração entre a estrutura modular, o sistema pneumático de sucção e o controle eletrônico da bomba, formando um sistema de manipulação destinado ao transporte e posicionamento de objetos. A estrutura desenvolvida permite a reconfiguração dos pontos de sucção, enquanto as ventosas realizam a fixação da peça e a bomba é responsável pela geração do vácuo. O Raspberry Pi, por sua vez, realiza o acionamento da bomba, permitindo controlar a sequência de funcionamento do sistema. Dessa forma, os resultados demonstram o atendimento aos requisitos relacionados à integração dos subsistemas e ao funcionamento do sistema de manipulação.

As decisões adotadas durante o desenvolvimento foram diretamente relacionadas aos requisitos estabelecidos para o projeto. A estrutura modular atende à necessidade de adaptação da garra às diferentes geometrias, o sistema de conexão por trilho contribui para a estabilidade dos módulos, as ventosas possibilitam a preensão por sucção e a integração com o manipulador permite realizar as etapas de movimentação e posicionamento. A configuração final também possibilitou simplificar o sistema pneumático por meio da ligação direta entre a bomba e as ventosas, mantendo a geração do vácuo e o controle do acionamento concentrados no conjunto desenvolvido.

Por fim, os testes experimentais com a chapa de acrílico possibilitaram verificar, de forma prática, o funcionamento da preensão por vácuo e a resposta do sistema ao acionamento da bomba. Embora o teste tenha demonstrado o funcionamento da preensão, a massa utilizada foi inferior à capacidade de 200 g estabelecida como requisito de projeto. Portanto, esse ensaio comprova o funcionamento do sistema de sucção, mas não permite, isoladamente, afirmar a validação da capacidade de carga de 200 g. Os resultados obtidos constituem, assim, a base para a continuidade dos testes relacionados à capacidade de carga, aderência, repetibilidade e segurança operacional, conforme os requisitos definidos para o sistema.

Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e implementar um sistema de manipulação baseado em ventosas, destinado à montagem em um manipulador robótico existente no Laboratório de Manufatura, capaz de realizar a fixação e o transporte de objetos, demonstrando sua aplicabilidade em processos industriais automatizados.

A fundamentação teórica realizada possibilitou compreender os princípios de funcionamento das ventosas e dos sistemas de manipulação, contribuindo para a definição da configuração adotada. A partir dos requisitos estabelecidos, foram selecionados os componentes necessários ao sistema, incluindo ventosas de silicone, bomba de vácuo, conexões e mangueiras.

A estrutura de suporte foi projetada e fabricada por impressão 3D, apresentando uma configuração modular inspirada em uma colmeia. Essa característica permite remover, reposicionar e ajustar os módulos conforme a geometria e as dimensões da peça. Para proporcionar maior estabilidade ao conjunto, foi desenvolvido um sistema de conexão semelhante a um trilho, restringindo o deslocamento dos módulos durante a operação.

A integração dos componentes mecânicos, pneumáticos e eletrônicos ao manipulador robótico possibilitou utilizar a estrutura desenvolvida como elemento de extremidade do robô. O acionamento da bomba foi realizado por meio de um Raspberry Pi, permitindo controlar seu funcionamento no modo liga/desliga (ON/OFF) e estabelecer a sequência de sucção, preensão, movimentação e liberação da peça.

Os testes experimentais realizados com uma chapa de acrílico de 100 × 100 mm e massa de 18,075 g demonstraram o funcionamento da preensão por vácuo e a resposta do sistema ao acionamento da bomba, além de verificar a integração entre os componentes envolvidos na geração e aplicação do vácuo. Entretanto, como a massa utilizada foi inferior aos 200 g estabelecidos como requisito de projeto, o ensaio realizado não permite comprovar a capacidade de carga especificada.

Dessa forma, considera-se que o objetivo geral foi alcançado, assim como os objetivos específicos relacionados à fundamentação teórica, seleção dos componentes, projeto e fabricação da estrutura e integração dos subsistemas. O sistema desenvolvido apresentou funcionamento adequado durante os testes realizados e demonstrou a

viabilidade da utilização de ventosas integradas a um manipulador robótico para a fixação e movimentação de objetos.

Como continuidade do trabalho, recomenda-se a realização de novos ensaios para avaliar quantitativamente a capacidade de carga, aderência, repetibilidade e segurança operacional, permitindo uma avaliação mais completa do desempenho do sistema desenvolvido.

Referências

Qual é o princípio de funcionamento da ventosa de vácuo? Ventosas de Vácuo. EUROTECH, 2024. Disponível em: https://eurotech-vacuum-technologies.com/pt/what-is-the-working-principle-of-vacuum-suction-cup. Acesso em: 22 jul. 2026.

Ventosas planas. MUDRAS. Disponível em: https://www.mudras.com.br/ventosa-planas.php. Acesso em: 22 jul. 2026.

Ventosas ovais. Piab. Disponível em: https://www.piab.com/pt-br/ventosas-e-garras-macias/ventosas-ovais. Acesso em: 22 jul. 2026.

Ventosas Industriais: Guia Completo de Soluções para Otimizar o Manuseio Industrial. ENGERMAN. Disponível em: https://www.engerman.com.br/blog/artigos/ventosas-industriais-guia-completo-de-solucoes-para-otimizar-o-manuseio-industrial. Acesso em: 22 jul. 2026.

FIEGENBAUM, Andrei et al. DESENVOLVIMENTO DE UMA GARRA ROBÓTICA DO TIPO VENTOSA PARA UM ROBÔ GANTRY COM ACIONAMENTO PNEUMÁTICO. 2016. Disponível em: https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaoconhecimento/article/view/6946/5713. Acesso em: 14 jul. 2026.

GENNARI, Gabriel Vieira et al. Manipulação de Objetos Através de Braços Robóticos Com Ventosa. Nome do Site. 2024. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/24949. Acesso em: 14 jul. 2026.

GOUVÊA, João Luiz Da Costa et al. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL DE APOIO AO PROCESSO DE SELEÇÃO DE GARRAS DE ROBÔS. Nome do Site. 1993. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/157772. Acesso em: 14 jul. 2026.

Anexos



Figura 1 – Fluxograma de etapas de desenvolvimento do projeto de uma garra pneumática



Figura 2 – Protótipo físico da garra de sucção desenvolvida



Figura 3 - Elementos para o sistema de acionamento a) Mini bomba de vácuo; b) Mangueira de silicone; c) Conexão em T; d) Ventosas de silicone.

CÓDIGO: ET1769

AUTOR: LAYS MENDES DA COSTA

ORIENTADOR: FABIANA VILLELA DA MOTTA

TÍTULO: Síntese e avaliação de heteroestruturas PbTiO3/ZnO para aplicações em piezofotocatálise

Resumo

Este trabalho teve como objetivo sintetizar a heteroestrutura $PbTiO_3$/ZnO pelo método hidrotérmico assistido por micro-ondas e avaliar suas propriedades catalíticas na remediação ambiental de meios aquosos. O estudo partiu da rota inicial $PbTiO_3$/CuO, que não apresentou sinergismo entre as fases, sendo posteriormente redirecionado para o sistema $PbTiO_3$/ZnO. A difração de raios X e a espectroscopia Raman confirmaram a formação das fases esperadas, sem a presença de fases secundárias. O efeito acoplado da piezocatálise e da fotocatálise foi investigado na degradação do corante Rodamina B (RhB). O compósito otimizado, contendo 10% de $PbTiO_3$ (P10Z), promoveu a degradação de 97,8% do corante em 15 minutos sob vibração ultrassônica (42 kHz, 240 W). Ensaios de reuso e estabilidade foram conduzidos com a amostra P10Z ao longo de quatro ciclos sucessivos de degradação. O material preservou a atividade catalítica e a estrutura cristalina ao final dos ciclos, indicando estabilidade química e viabilidade de reutilização.

Palavras-chave: Piezocatálise; Heteroestruturas; Semicondutores; Hidrotermal.

TITLE: Synthesis and evaluation of PbTiO3/CuO heterostructures

Abstract

This work aimed to synthesize the $PbTiO_3$/ZnO heterostructure using the microwave-assisted hydrothermal method and to evaluate its catalytic properties in the environmental remediation of aqueous media. The study initially followed the $PbTiO_3$/CuO route, which did not show synergism between the phases, and was subsequently redirected to the $PbTiO_3$/ZnO system. X-ray diffraction and Raman spectroscopy confirmed the formation of the expected phases, with no presence of secondary phases. The combined effect of piezocatalysis and photocatalysis was investigated in the degradation of Rhodamine B (RhB) dye. The optimized composite, containing 10% $PbTiO_3$ (P10Z), promoted the degradation of 97.8% of the dye in 15 minutes under ultrasonic vibration (42 kHz, 240 W). Reuse and stability tests were conducted with the P10Z sample over four successive degradation cycles. The material

preserved its catalytic activity and crystalline structure at the end of the cycles, indicating chemical stability and reusability.

Keywords: Piezocatalysis; Heterostructures; Semiconductors; Hydrothermal.

Introdução

A poluição ambiental compromete os ecossistemas e a saúde humana. Entre suas principais fontes destacam-se os efluentes industriais, que frequentemente contêm substâncias tóxicas e poluentes persistentes [1]. Dentre as alternativas de tratamento, os processos oxidativos avançados (POA) têm sido amplamente empregados no tratamento desses efluentes [2]. A fotocatálise heterogênea figura entre os mecanismos mais estudados: espécies oxidantes reativas degradam os poluentes, convertendo-os em moléculas menores, como água e CO_2 [3,4]. Os materiais fotocatalíticos apresentam limitações, sobretudo a recombinação dos pares elétron-buraco, que compromete o transporte de carga. Como estratégia para minimizar essa recombinação, propôs-se o aproveitamento do efeito piezoelétrico na separação dos portadores de carga [5,6]. Sob solicitação mecânica, o material piezoelétrico gera um campo elétrico interno que favorece a separação e o transporte de elétrons e buracos [7,8]. O $PbTiO_3$ (PTO) é uma perovskita ferroelétrica com elevada constante piezoelétrica, adequada ao acoplamento entre o efeito piezoelétrico e a fotocatálise. O plano de trabalho original previa a combinação do PTO com o CuO, um semicondutor de gap estreito, visando ampliar a absorção na região do visível. Contudo, o sistema $PbTiO_3$/CuO não apresentou sinergismo, o que motivou a substituição do CuO pelo ZnO. O ZnO reúne baixo custo, elevada capacidade de mineralização, resposta piezoelétrica e band gap na região do ultravioleta (~3,2 eV) [9-12], formando com o PTO uma heterojunção que favorece a transferência de carga através da interface [13,14]. Neste trabalho, a heterojunção $PbTiO_3$/ZnO foi obtida por via hidrotérmica assistida por micro-ondas e avaliada na degradação da RhB sob irradiação luminosa e vibração ultrassônica. O presente relatório apresenta a avaliação da rota original com CuO, a justificativa para a substituição do óxido e a caracterização do novo sistema.

Metodologia

Síntese do $PbTiO_3$ (PTO) O $PbTiO_3$ foi preparado por rota sonoquímica, na qual a cavitação acústica promove a nucleação homogênea e a distribuição uniforme das partículas. O isopropóxido de titânio (0,94 g) foi disperso em 60 mL de etanol absoluto, e o acetato de chumbo (1,25 g) em 20 mL de água destilada; o pH da mistura foi ajustado para aproximadamente 10 com NaOH 1 mol L^{-1}. A suspensão foi submetida à sonicação por sonda por 30 min, e o sólido resultante foi calcinado a 500 °C por 3 h para a cristalização da fase perovskita. Síntese do $PbTiO_3$/CuO (rota original) Na rota original, o CuO foi combinado ao $PbTiO_3$ por precipitação em meio fortemente alcalino (pH 13, com NaOH). Essa condição resultou em aglomeração e baixa integridade da interface, o que motivou a substituição do óxido, conforme discutido na Seção

1. Síntese do $PbTiO_3$/ZnO A heteroestrutura foi obtida em duas etapas: o $PbTiO_3$ pré-formado atua como substrato para o crescimento do ZnO, estabelecendo a interface entre as fases. O acetato de zinco (5 mmol) foi dissolvido em 50 mL de água destilada a 50 °C, e o $PbTiO_3$ foi adicionado em diferentes proporções mássicas. O pH foi ajustado para 10 com hidróxido de amônio, condição mais branda do que a precipitação em pH 13 e associada a maior integridade interfacial. A reação foi conduzida por via hidrotérmica assistida por micro-ondas a 140 °C por 30 min; o aquecimento rápido e uniforme, aliado ao curto tempo de reação, favorece o contato íntimo entre $PbTiO_3$ e ZnO. Em seguida, o precipitado foi lavado e seco. Foram preparadas composições com 10%, 15% e 20% de $PbTiO_3$ em relação ao ZnO, denominadas P10Z, P15Z e P20Z. A Figura 1 resume o procedimento.

Resultados e Discussões

1. Avaliação do sistema $PbTiO_3$/CuO e justificativa da modificação A rota original propunha combinar o PTO com o CuO, um óxido de gap estreito, com o intuito de ampliar a absorção na região do visível e auxiliar a separação de cargas. Os ensaios de degradação, entretanto, revelaram um efeito inibitório: o desempenho dos compósitos contendo CuO foi inferior ao do PTO puro. A Figura 2 apresenta os espectros de absorção UV-Vis da Rodamina B para o PTO puro e para os compósitos com CuO. A absorbância residual em 554 nm, correspondente ao pico de absorção da RhB, aumenta com o aumento do teor de CuO de 5% para 15%. Esse comportamento indica que o CuO atuou como centro de recombinação e como barreira física, e não como cocatalisador. Três fatores explicam o desempenho insatisfatório dessa rota. Primeiro, a elevada taxa de recombinação intrínseca do CuO impediu que os elétrons gerados no PTO alcançassem a superfície para participar das reações redox. Segundo, a coloração escura do CuO provocou blindagem óptica e, sobretudo, atenuação da energia acústica: o espalhamento das ondas ultrassônicas reduziu a cavitação na superfície do catalisador, necessária à ativação piezocatalítica. Terceiro, a precipitação em pH 13 ocasionou aglomeração e baixa integridade da interface. A substituição pelo ZnO, sintetizado em pH 10 por via hidrotérmica assistida por micro-ondas, contornou essas limitações e assegurou contato adequado entre as fases. 2. Difração de raios X e espectroscopia Raman A Figura 3 apresenta os difratogramas (a) e os espectros Raman (b) das amostras. Os picos de DRX confirmam a fase perovskita tetragonal do $PbTiO_3$ e a fase wurtzita do ZnO (fichas PDF 78-299 e 36-1451). Nos compósitos P10Z, P15Z e P20Z, observam-se os planos característicos das duas fases, sem picos atribuíveis a impurezas ou fases secundárias. A intensidade das reflexões do PTO aumenta com o teor incorporado. Os espectros Raman corroboram a presença das duas fases: os modos vibracionais do ZnO (E_2, A_1, E_1) e os do $PbTiO_3$ coexistem nos compósitos, em concordância com os resultados de DRX. 3. Morfología de las partículas As imagens foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG). O ZnO puro exibe nanobastões, enquanto o PTO apresenta aglomerados. Com a incorporação do PTO, a morfologia evolui para estruturas hierárquicas do tipo flower-like, constituídas por bastões agregados (Figura 4). Essa organização

expõe um número maior de sítios ativos e origina uma rede de mesoporos que facilita a difusão do poluente. O mapeamento por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) confirma a distribuição homogênea dos elementos Pb, Ti, Zn e O na heteroestrutura, indicando a formação da interface entre as fases (Figura 5). 5. Degradação A atividade catalítica das heteroestruturas $PbTiO_3$/ZnO e dos materiais puros foi avaliada na degradação da Rodamina B sob irradiação luminosa e sob vibração ultrassônica (42 kHz, 240 W). A Figura 9a-b apresenta as curvas de C/C_0 e o ajuste ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem: o P10Z exibe a maior constante de velocidade e degrada 97,8% do corante em 15 minutos, superando o PTO, o ZnO puro e os demais teores avaliados. A investigação das condições reacionais (Figura 6c-d) indica melhor desempenho para menores concentrações de corante e para dosagem de catalisador em torno de 1,0 g L^{-1}. Os ensaios com sequestradores de espécies reativas e a análise por ressonância paramagnética eletrônica (EPR) permitiram identificar as espécies ativas (Figura 7). A supressão da degradação na presença de BZQ e de TBA indica que os radicais superóxido ($\bullet O_2^-$) e hidroxila (•OH) constituem as principais espécies envolvidas, ao passo que o EDTA, sequestrador de lacunas, exerceu um efeito menos pronunciado. Sob estímulo, os sinais de $\bullet O_2^-$ e •OH são observados no espectro de EPR, permanecendo ausentes na ausência de irradiação. O mecanismo proposto é coerente com uma heterojunção do tipo II (Figura 8). Os elétrons acumulados na banda de condução do ZnO (−0,49 V vs. NHE) reduzem o O_2 a $\bullet O_2^-$ ($O_2/\bullet O_2^- \approx -0{,}33$ V), enquanto as lacunas na banda de valência do PTO (2,29 V) oxidam o OH^- a •OH ($OH^-/\bullet OH \approx 1{,}99$ V). Sob solicitação mecânica, o piezopotencial promove o encurvamento das bandas e acelera a separação de cargas, o que é consistente com as espécies identificadas nos ensaios de degradação. 6. Reuso e estabilidade A estabilidade do P10Z foi avaliada ao longo de quatro ciclos sucessivos de degradação da RhB. A eficiência variou de 97,8% no primeiro ciclo para 91,6%, 90,5% e 79,5% nos ciclos subsequentes (Figura 9a). Os difratogramas obtidos antes e após os ciclos coincidem em posição e intensidade dos picos (Figura 9b), o que indica resistência à fotocorrosão e à lixiviação sob cavitação e confirma a estabilidade estrutural do material.

Conclusão

A rota original $PbTiO_3$/CuO não apresentou sinergismo: o desempenho diminuiu com o aumento do teor de CuO, em decorrência da elevada recombinação do óxido, da atenuação acústica associada à sua coloração escura e da baixa integridade da interface obtida por precipitação em pH elevado. A identificação dessas limitações nas etapas iniciais orientou a substituição do óxido. A substituição do CuO pelo ZnO, associada à síntese hidrotérmica assistida por micro-ondas, resultou na heteroestrutura P10Z, caracterizada por morfologia hierárquica, maior área superficial, heterojunção do tipo II e menor recombinação. O compósito degradou 97,8% da Rodamina B em 15 minutos, mantendo 79,5% de eficiência após quatro ciclos e preservando a estrutura cristalina, como evidenciado por DRX. Em conjunto, os resultados indicam que a heterojunção $PbTiO_3$/ZnO é promissora para o

tratamento de efluentes por piezofotocatálise e justificam a continuidade dos estudos com esse sistema.

Referências

[1] ONG, C. B.; NG, L. Y.; MOHAMMAD, A. W. A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: synthesis, mechanisms and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, p. 536–551, 2018. [2] LEE, K. M. et al. Recent developments of zinc oxide-based photocatalysts in water treatment technology: a review. Water Research, v. 88, p. 428–448, 2016. [3] ZHOU, X. et al. Semiconducting piezoelectric heterostructures for piezo- and piezophotocatalysis. Nano Energy, v. 96, 107141, 2022. [4] YANG, G. et al. Spatially separated redox cocatalysts on ferroelectric nanoplates for improved piezophotocatalytic CO_2 reduction and H_2O oxidation. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022. [5] LIU, T. et al. Synthesis of novel flower-like $Bi_4Ti_3O_{12}$/BiOCl heterojunctions with excellent piezoelectric photocatalytic performance. Journal of Alloys and Compounds, v. 966, 171572, 2023. [6] JIANG, Z. et al. Piezoelectric-induced internal electric field in Bi_2WO_6 nanoplates for boosting the photocatalytic degradation of organic pollutants. ACS Applied Nano Materials, v. 5, p. 7588–7597, 2022. [7] RANJAN, A. et al. Enhanced piezocatalytic activity in $Bi_{1/2}Na_{1/2}TiO_3$ for water splitting by oxygen vacancy engineering. ACS Applied Materials & Interfaces, v. 14, p. 35635–35644, 2022. [8] WANG, Z. et al. A novel ZnO/CQDs/PVDF piezoelectric system for efficient degradation of antibiotics using water flow energy in a pipeline—Nano Energy, v. 107, 108162, 2023. [9] HUANG, X. et al. Insight into the piezo-photo coupling effect of $PbTiO_3$/CdS composites for piezophotocatalytic hydrogen production. Applied Catalysis B, v. 282, 2021. [10] ZHAO, S. et al. Ferroelectric perovskite $PbTiO_3$ for advanced photocatalysis. Rare Metals, v. 43, p. 4038–4055, 2024. [11] AMIRI, O. et al. Purification of wastewater by the piezo-catalyst effect of $PbTiO_3$ nanostructures under ultrasonic vibration. Journal of Hazardous Materials, v. 394, 2020. [12] LOW, J. et al. Heterojunction photocatalysts. Advanced Materials, v. 29, 1601694, 2017. [13] QIN, M.-Z. et al. 2D/2D heterojunction systems for the removal of organic pollutants: a review. Advances in Colloid and Interface Science, v. 297, 102540, 2021. [14] GAO, Q. et al. Significant improvement and mechanism of tetracycline degradation with the synergistic piezoelectric effect of ZnO/CuS Z-scheme heterojunction photocatalysts. Environmental Science: Nano, v. 10, p. 581–594, 2023.

Anexos



Figura 1 – Esquema de síntese: (a) $PbTiO_3$ por rota sonoquímica e (b) heteroestrutura $PbTiO_3$/ZnO por via hidrotérmica assistida por micro-ondas.



Figura 2 – Espectros de absorção UV-Vis da Rodamina B para o PTO puro, para os compósitos PTO-CuO (5%, 10% e 15%) e para o CuO.



Figura 4 – Micrografias (MEV-FEG) do ZnO, do PTO e dos compósitos $PbTiO_3$/ZnO.



Figura 8– Alinhamento de bandas e mecanismo de degradação da heterojunção do tipo II $PbTiO_3$/ZnO (potenciais vs. NHE).



Figura 9. (a) Eficiência de degradação ao longo dos ciclos de reuso e (b) difratogramas do P10Z antes e depois dos ciclos.



Figura 3 – (a) Difratogramas de raios X e (b) espectros Raman do PTO, do ZnO e dos compósitos P10Z, P15Z e P20Z.



Figura 7. (a) Efeito dos sequestradores de espécies (EDTA, BZQ e TBA) e (b) espectros de EPR



Figura 6. Degradação da Rodamina B: (a) C/C_0 em função do tempo, (b) cinética de pseudo-primeira ordem, (c) efeito da concentração de corante e (d) efeito da dosagem de catalisador

CÓDIGO: HS0018

AUTOR: EMILY JORDANA MOURA DE MACEDO

ORIENTADOR: GLEICE VIRGINIA MEDEIROS DE AZAMBUJA ELALI

TÍTULO: O Conjunto Lagoa Nova 1 segundo a percepção de seus antigos moradores

Resumo

No contexto urbano contemporâneo, marcado por processos intensos de adensamento, reconfiguração morfológica e diversificação de usos, compreender as transformações espaciais das cidades ao longo do tempo é essencial para a reflexão sobre o planejamento urbano e habitacional. Com essa intenção, o projeto de pesquisa maior investigou a evolução do Conjunto Habitacional Lagoa Nova I (LN-1), localizado em Natal/RN, ao longo de quatro décadas - da sua ocupação inicial à atualidade. Sua primeira etapa investigou macro condições relativas ao contexto e à área e a segunda etapa buscou compreender a percepção dos moradores que estão na comunidade desde a inauguração, sendo este o foco do plano de trabalho. tendo como primeira etapa A pesquisa incluiu visitas in loco, produção de gráficos analíticos e entrevistas com os moradores. Os dados obtidos revelaram mudanças significativas no conjunto devidas ao aumento do fluxo de pessoas e veículos ao longo do tempo, à incorporação de novos usos, à preocupação dos moradores com a segurança e à elevação dos muros. A análise evidenciou as transformações ocorridas dos conjuntos habitacionais em virtude das transformações urbanas e destacou a importância das abordagens de longo prazo para o entendimento das dinâmicas territoriais.

Palavras-chave: Cidade, Transformação, População, Conjunto Lagoa Nova I

TITLE: The Lagoa Nova 1 Housing Complex as perceived by its long-time residents

Abstract

In the contemporary urban context—characterized by intense processes of densification, morphological reconfiguration, and the diversification of land uses—understanding the spatial transformations of cities over time is essential for reflecting on urban and housing planning. With this aim, a broader research project investigated the evolution of the Lagoa Nova I (LN-1) housing complex in Natal, Rio Grande do Norte, spanning four decades—from its initial occupation to the present day. The first stage examined

macro-level conditions regarding the context and the site, while the second stage sought to understand the perceptions of residents who have lived in the community since its inauguration; this latter stage constitutes the focus of the current work plan. The research involved on-site visits, the creation of analytical graphics, and interviews with residents. The data revealed significant changes in the complex driven by increased pedestrian and vehicular traffic over time, the introduction of new uses, residents' concerns regarding security, and the raising of boundary walls. The analysis highlighted the transformations undergone by housing complexes in response to broader urban changes and underscored the importance of long-term approaches for understanding territorial dynamics.

Keywords: City, Transformation, Population, Lagoa Nova I Housing Complex

Introdução

No Brasil, os conjuntos habitacionais exercem papel central na estruturação na urbana, especialmente a partir das décadas de 1960 e 1970, quando a disseminação da ideologia da casa própria e a atuação do Banco Nacional da Habitação (BNH) impulsionaram a produção massiva de habitações populares (Ferreira & Câmara, 1996). Muitos desses empreendimentos foram aprovados com base em planos diretores vigentes à época, promovidos por cooperativas ou pela iniciativa privada, tornando-se agentes ativos na redefinição do tecido urbano. Em Natal/RN, estima-se que, nos anos 1980, os conjuntos habitacionais ocupavam cerca de 25% do território urbano, percentual que alcançou aproximadamente 37% nos anos 2000, com destaque para a intensa expansão da Zona Norte, voltada majoritariamente à população de baixa renda (Ferreira & Câmara, 1996; Medeiros, 2007).

Inserido nesse contexto, o projeto de pesquisa "Retornando ao Conjunto Habitacional Lagoa Nova I" se propôs a analisar as transformações ocorridas no Conjunto Habitacional Lagoa Nova I (LN-1), localizado na cidade de Natal/RN, decorridas aproximadamente cinco décadas desde sua inauguração, em 1975. Desenvolvida a partir de uma perspectiva longitudinal, a pesquisa continuou estudos realizados pela mesma pesquisadora nos anos de 1982 e 2002, possibilitando a comparação das permanências e mudanças observadas ao longo do tempo.

Inaugurado em janeiro de 1975, o Conjunto Habitacional Lagoa Nova I foi implantado com 264 unidades habitacionais unifamiliares isoladas, distribuídas em lotes de aproximadamente 240 m². Desde sua implantação, o conjunto vem sendo acompanhado por pesquisas desenvolvidas no âmbito da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, realizadas inicialmente em 1982, posteriormente em 2002 e, atualmente, retomadas por meio de uma abordagem longitudinal que busca compreender sua evolução física, funcional e social ao longo de aproximadamente cinco décadas de ocupação (Elali; Silva, 1982).

Na primeira etapa da pesquisa, foram desenvolvidos levantamentos documentais, análises históricas, urbanísticas e morfológicas, além da caracterização física do conjunto e de seu entorno, buscando compreender o contexto de implantação do

empreendimento e as principais transformações espaciais ocorridas desde sua construção. A segunda etapa (2025/2026) concentrou-se na dimensão qualitativa da investigação, tendo como foco a realização de entrevistas semiestruturadas com moradores mais antigos do Conjunto Habitacional Lagoa Nova I. A partir dos relatos desses residentes, busca-se compreender como as transformações urbanas, habitacionais e sociais foram percebidas e vivenciadas ao longo das últimas décadas, valorizando a memória dos moradores como instrumento fundamental para a interpretação da evolução do conjunto.

Desse modo, esta fase da pesquisa procurou articular as informações obtidas por meio das entrevistas às análises realizadas anteriormente, permitindo uma leitura integrada das transformações do Conjunto Habitacional Lagoa Nova I, tanto sob a perspectiva física quanto sob a ótica das experiências e percepções de seus moradores.

Metodologia

Esta etapa da pesquisa caracteriza-se como uma investigação de abordagem qualitativa, voltada à compreensão das transformações do Conjunto Habitacional Lagoa Nova I (LN-1) a partir das percepções e experiências de seus moradores mais antigos. Ela deu continuidade à etapa anterior da pesquisa, na qual foram desenvolvidas três fases complementares, sendo a análise das transformações urbanas no entorno do Conjunto Lagoa Nova I (LN-1), com a elaboração de mapas de uso do solo, gráficos e linhas do tempo, a análise interna do LN-1, com a produção de um mapa atualizado de uso do solo do conjunto e a última etapa consistiu no mapeamento das residências mais antigas do LN-1.

Como ponto de partida para a atual etapa, utilizou-se o levantamento realizado anteriormente para identificação das residências do conjunto que ainda mantinham a função original (habitação), obtido por meio de visitas de campo e entrevistas exploratórias com moradores e usuários do LN-1. A partir desse levantamento, e entendendo-se que o tempo de contato com a área seria determinante para a compreensão da dinâmica local, foram selecionados residentes com maior tempo de moradia no conjunto, variando entre 40 a 45 anos de permanência. A pesquisa foi submetida ao Comitê de Ética da UFRN, sendo aprovada pelo CAAE n. 94192225.4.0000.5292.

Foram realizadas 15 entrevistas semiestruturadas com moradores residentes no Conjunto Habitacional Lagoa Nova I há mais de 40 anos. O roteiro das entrevistas foi estruturado em quatro eixos principais: (i) caracterização do entrevistado e da unidade habitacional; (ii) percepção das transformações ocorridas no entorno do conjunto e no próprio LN-1 ao longo do tempo; (iii) modificações realizadas nas residências e necessidades atuais de intervenção; e (iv) percepção sobre as características consideradas mais importantes nos diferentes ambientes da habitação, por meio da seleção de atributos previamente definidos.

Após a realização das entrevistas, os depoimentos foram organizados em um corpus textual único e submetidos à análise textual com o auxílio do software IRaMuTeQ

(Interface de R pour les Analyses Multidimensionnelles de Textes et de Questionnaires), reconhecido por efetuar análises textuais e disponibilizar os resultados através de interface visual de fácil compreensão (Camargo; Justo, 2013).

Inicialmente, os relatos passaram por um processo de padronização textual, com uniformização de termos, remoção de palavras de baixa relevância analítica e adequação do corpus às exigências do software. Em seguida, foram realizadas análises lexicais, incluindo nuvem de palavras, análise de similitude, Classificação Hierárquica Descendente (CHD) e Análise Fatorial de Correspondência (AFC), permitindo identificar recorrências,associações entre termos e agrupamentos temáticos presentes nos discursos dos entrevistados.

Por fim, os resultados obtidos por meio das análises textuais foram interpretados de forma integrada às informações produzidas na etapa anterior da pesquisa, possibilitando relacionar as transformações físicas observadas no conjunto e em seu entorno às percepções, memórias e experiências dos moradores, contribuindo para uma compreensão mais abrangente da evolução do Conjunto Habitacional Lagoa Nova I ao longo de aproximadamente cinco décadas de ocupação.

Resultados e Discussões

Foram realizadas quinze entrevistas semiestruturadas com moradores antigos do Conjunto Habitacional Lagoa Nova I, cujos relatos foram organizados em um corpus textual e submetidos à análise lexical por meio do software IRaMuTeQ. As análises contemplaram a geração de nuvem de palavras, análise de similitude, Classificação Hierárquica Descendente (CHD) e Análise Fatorial de Correspondência (AFC), permitindo identificar os principais temas presentes nos discursos e as relações estabelecidas entre eles.

A nuvem de palavras evidencia a predominância do termo "casa", indicando que a residência constitui o principal elemento organizador das narrativas dos entrevistados. Em torno desse núcleo aparecem palavras como ventilação, família, necessidade, reforma, quintal, fachada, características, cozinha, quarto, terraço e conjunto, revelando que os moradores relacionam constantemente a experiência de morar às adaptações realizadas na habitação e às condições de conforto dos ambientes.

A análise de similitude confirma essa interpretação ao evidenciar que "casa" constitui o principal vértice da rede lexical, estabelecendo conexões diretas com praticamente todos os demais temas abordados nas entrevistas. Observa-se que desse núcleo central derivam quatro grandes eixos de discussão.

O primeiro eixo relaciona a casa às transformações familiares, representadas pelas conexões entre os termos família, filho e transformação, indicando que as modificações realizadas nas residências acompanharam mudanças no ciclo de vida dos moradores, especialmente a saída dos filhos e a reorganização da estrutura familiar.

O segundo eixo associa a casa às reformas e necessidades habitacionais, evidenciado pelas palavras reforma, necessidade, mudanças e ventilação. Os relatos demonstram que, ao longo das décadas, praticamente todas as residências passaram por adaptações construtivas destinadas à ampliação dos espaços, melhoria das condições ambientais, aumento da segurança e atualização dos materiais construtivos.

O terceiro eixo corresponde às características desejadas da habitação, reunindo termos como terraço, quintal, fachada, muro, cozinha, quarto e banheiro. Esse agrupamento demonstra que os entrevistados atribuem grande importância aos atributos físicos da residência, especialmente ambientes ventilados, espaços amplos, áreas externas e elementos relacionados à segurança.

Por fim, observa-se um quarto eixo relacionado às transformações urbanas, representado pelas conexões entre conjunto, aumento, fluxo, veículos, comércio, pavimentação, infraestrutura e dinâmica urbana. Esse agrupamento evidencia que os moradores percebem uma intensificação significativa da urbanização do entorno, destacando principalmente o crescimento do comércio, o aumento do fluxo de veículos e as intervenções viárias realizadas nas últimas décadas. Essas percepções corroboram os levantamentos cartográficos desenvolvidos na etapa anterior da pesquisa, que identificaram o aumento da diversidade de usos do solo, a intensificação dos fluxos urbanos e a valorização imobiliária da região após a implantação de equipamentos como a Arena das Dunas, centros comerciais e instituições públicas (Farias et al., 2017; Tavares, 2010).

Esses resultados são corroborados pela Análise Fatorial de Correspondência, que organiza o corpus em dois grandes campos temáticos. No lado direito do plano fatorial concentram-se palavras relacionadas às transformações urbanas, como transformação, veículos, fluxo, aumento, intensificação, estabelecimento comercial, viaduto e crescimento, indicando que parte significativa dos discursos está voltada às mudanças ocorridas no entorno do conjunto, especialmente após as intervenções associadas à construção da Arena das Dunas e das obras de mobilidade urbana.

Em contraposição, o lado esquerdo reúne termos ligados à habitação e às características físicas da residência, como quarto, cozinha, banheiro, fachada, muro, quintal, ventilação e adequado, demonstrando que outro conjunto importante de relatos concentra-se na percepção da qualidade da moradia e nas adaptações realizadas ao longo do tempo.

A Classificação Hierárquica Descendente complementa essas análises ao dividir o corpus em sete classes lexicais, representando diferentes núcleos temáticos presentes nas entrevistas. Embora interrelacionadas, essas classes revelam que os discursos dos moradores abordam simultaneamente aspectos ligados às transformações urbanas do entorno, às mudanças ocorridas nas residências, às adaptações decorrentes do ciclo de vida familiar e às características consideradas essenciais para uma habitação de qualidade.

Observa-se que as classes apresentam distribuição relativamente equilibrada, com frequências variando entre aproximadamente 11,5% e 15,4% do corpus, indicando que não existe um único tema predominante. Pelo contrário, os resultados revelam uma percepção multifacetada dos moradores acerca da evolução do Conjunto Habitacional Lagoa Nova I, na qual aspectos urbanos, sociais e habitacionais aparecem articulados.

De modo geral, as análises lexicais evidenciam que as transformações percebidas pelos moradores extrapolam as modificações físicas das edificações. Os relatos demonstram que o crescimento urbano do entorno, a implantação de novos equipamentos, a intensificação dos fluxos, o aumento das atividades comerciais e as obras de mobilidadealteraram significativamente a dinâmica cotidiana do conjunto. Paralelamente, as adaptações realizadas nas residências refletem mudanças familiares, necessidades de conforto ambiental e preocupações relacionadas à segurança, evidenciando um processo contínuo de apropriação e transformação do espaço habitado.

Assim, os resultados obtidos por meio do IRaMuTeQ reforçam a importância da memória dos moradores como instrumento para compreender a evolução do Conjunto Habitacional Lagoa Nova I, permitindo relacionar as transformações físicas identificadas nas etapas anteriores da pesquisa às experiências vividas pela população residente ao longo de aproximadamente cinco décadas de ocupação.

Conclusão

A análise das transformações no Conjunto Habitacional Lagoa Nova I, sob a perspectiva de seus moradores mais antigos, evidenciou os impactos produzidos pelas mudanças urbanas ocorridas em Natal ao longo das últimas décadas. Os relatos demonstram que o conjunto deixou de ocupar uma área periférica e pouco urbanizada para integrar uma região consolidada, central e adensada. Nesse processo, o território evoluiu de uma área predominantemente residencial para um espaço multifuncional, estruturado pela presença de comércio, serviços e instituições públicas, resultado tanto da expansão urbana quanto das adaptações promovidas pelos próprios moradores.

As entrevistas revelaram que as transformações mais marcantes percebidas pela população estão relacionadas às intervenções viárias associadas à intensificação das atividades comerciais, às mudanças na dinâmica urbana do entorno, ao aumento do fluxo de veículos, muitos dos quais vinculados à Copa do Mundo de 2014 e à implantação da Arena das Dunas. Paralelamente, também foram identificadas alterações na escala da moradia, motivadas tanto pelas necessidades familiares quanto pelas novas condições urbanas, refletidas em reformas, ampliações e adaptações voltadas principalmente ao aumento da segurança, com a construção de muros mais altos e cercas elétricas.

A análise lexical realizada por meio do IRaMuTeQ corroborou essas percepções, evidenciando a recorrência de termos associados à casa, família, transformações, reformas, ventilação, segurança e conjunto, indicando que as mudanças urbanas são interpretadas pelos moradores a partir de suas experiências cotidianas e das adaptações realizadas na própria habitação. Dessa forma, os resultados reforçam as interpretações obtidas nas entrevistas qualitativas, permitindo identificar padrões discursivos comuns entre os entrevistados.

A pesquisa reforça, assim, a importância de estudos que incorporam a memória dos moradores como instrumento de compreensão da evolução urbana e habitacional. A permanência dessas famílias no Conjunto Lagoa Nova I possibilita reconstruir processos que dificilmente seriam identificados apenas por meio de levantamentos

cartográficos ou documentais, revelando aspectos relacionados às experiências cotidianas, às percepções sobre o bairro e às estratégias de adaptação adotadas ao longo dos anos.

Por fim, os resultados desta etapa demonstram que as transformações observadas no Conjunto Habitacional Lagoa Nova I extrapolam as alterações físicas das residências, refletindo processos mais amplos de evolução urbana vivenciados pela cidade de Natal. A valorização da região, impulsionada pela implantação de equipamentos urbanos, pela expansão do comércio e pela intensificação dos fluxos, modificou significativamente a relação dos moradores com o espaço, evidenciada pela necessidade de adaptações nas moradias e por mudanças na percepção de segurança, mobilidade e qualidade de vida. Embora a pesquisa não tenha como objetivo caracterizar processos de

Referências

AZAMBUJA, G.; SILVA, E. D. Conjuntos habitacionais: uma crise de identidade (monografia). Trabalho Final de Graduação. CAU/UFRN, 1983.

CAMARGO, B. V.; JUSTO, A. M. IRAMUTEQ: um software gratuito para análise de dados textuais. Temas em Psicologia, v. 21, n. 2, p. 513-518, 2013. Disponível em:http://dx.doi.org/10.9788/TP2013.2-16.

ELALI, G. A.; SILVA, E. D. Conjuntos habitacionais: uma crise de identidade. Trabalho de graduação não publicado. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Curso de Arquitetura e Urbanismo, 1982.

FARIAS, T. M.; GURGEL, F. F.; DINIZ, R. F.; ELALI, G. A. A Copa do Mundo 2014 em Natal (RN-Brasil): um estudo sobre a percepção dos moradores. Research, Society and Development, v. 5, p. 49-76, 2017.

FERREIRA, A. A. C.; CÂMARA, L. A. P. O sistema de incorporação na produção do espaço urbano em Natal. In: RIBEIRO, L. C. Q. A crise da moradia nas grandes cidades: da questão da habitação à reforma urbana. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1996.

MEDEIROS, S. R. F. Q.A casa própria: sonho ou realidade? Um olhar sobre os conjuntos habitacionais em Natal. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007. Dissertação (Mestrado).

TAVARES, M. L.A cidade vertical: morfologia e crescimento vertical em áreas centrais. São Paulo: Annablume, 2010.

Anexos





Apêndice

CÓDIGO: HS0131

AUTOR: MARIA EDUARDA LEANDRO ARAUJO

ORIENTADOR: BARBARA LAIS FELIPE DE OLIVEIRA

TÍTULO: Integração de IA, Modelagem 3D e Fabricação Digital no Patrimônio Arquitetônico

Resumo

O artigo analisa a integração entre Inteligência Artificial (IA), modelagem 3D e fabricação digital na arquitetura, com foco na documentação do patrimônio histórico para ampliar as possibilidades de registro, interpretação e representação das informações relacionadas aos bens patrimoniais. A metodologia baseou-se na *Design Science Research* (DSR), combinando revisão sistemática da literatura (2020-2025) e desenvolvendo uma metodologia para transformar imagens em objetos 3D, nesse trabalho ela foi aplicada em um teste piloto no pináculo do Engenho Cruzeiro, em Ceará-Mirim (RN). A revisão mostrou domínio da literatura em inglês e uma lacuna significativa em português, com apenas 16 artigos que apresentaram convergência entre as ferramentas analisadas aplicadas à arquitetura. Identificou-se a necessidade de criar um fluxo de rastreabilidade para distinguir o que é fato histórico comprovado de inferências geradas por IA. O teste prático processou uma única fotografia datada de 1999 e gerou um modelo 3D codificado por cores, denominado de Fidelidade Geométrica que indica o quanto cada superfície/volumetria gerada corresponde às informações visíveis e comprováveis na fotografia, permitindo mapear os níveis de incertezas. Posteriormente o modelo foi impresso em 3D. Os resultados demonstram o potencial da IA associada ao controle das incertezas, para a documentação do patrimônio, e o protótipo impresso pode contribuir no ensino e na acessibilidade do patrimônio arquitetônico.

Palavras-chave: IA, Patrimônio Arquitetônico, Fabricação Digital, Modelagem 3D.

TITLE: Integration of AI, 3D Modeling and Digital Fabrication in Architectural Heritage

Abstract

This article analyzes the integration of Artificial Intelligence (AI), 3D modeling, and digital fabrication in architecture, with a focus on the documentation of historical heritage to expand the possibilities for recording, interpreting, and representing information related to heritage assets. The methodology was based on Design Science Research (DSR), combining a systematic literature review (2020–2025) with the development of a methodology for transforming images into 3D objects; tested on the pinnacle of the Engenho Cruzeiro in Ceará-Mirim (RN). The review revealed a dominance of English-language literature and a significant gap in Portuguese-language literature, with only 16 articles demonstrating convergence among the analyzed tools applied to architecture. The need to create a traceability workflow was identified to distinguish between proven historical facts and inferences generated by AI. The practical test processed a single photograph dated 1999 and generated a color-coded 3D model, called “Geometric Fidelity,” which indicates the extent to which each generated surface or volume corresponds to the visible and verifiable information in the photograph, thereby allowing the mapping of uncertainty levels. The model was subsequently 3D-printed. The results demonstrate the potential of AI, combined with uncertainty management, for heritage documentation, and the printed prototype can contribute to education and accessibility regarding architectural heritage.

Keywords: AI, Architectural Heritage, Digital Fabrication, 3D Modeling.

Introdução

A pesquisa investiga como a inteligência artificial (IA), a modelagem tridimensional e a fabricação digital se integram no campo da Arquitetura e do Urbanismo. O problema central é a fragmentação entre essas três tecnologias na prática arquitetônica e na produção acadêmica brasileira. Cada área possui bibliografia própria, mas os fluxos de trabalho que as conectam ainda não estão documentados de forma sistemática na literatura em português. Essa lacuna é ainda mais evidente na documentação e preservação do patrimônio arquitetônico. O uso da IA vem crescendo na literatura internacional, mas no Brasil essa aplicação ainda é escassa e raramente acompanhada de protocolos que registrem o que o modelo gerou por inferência e o que a fonte histórica confirma. O resultado é um conjunto de reconstruções digitais visualmente hiper-realistas que não possuem rastreabilidade documental, pois não é possível identificar a origem, a fonte ou o grau de confiabilidade de cada informação incorporada ao modelo, fazendo com que geometrias inferidas e dados confirmados ocupam o mesmo modelo sem distinção.

Historicamente, a arquitetura dependia de processos lineares de concepção e construção. Com o avanço tecnológico, a IA passou a ser usada para otimização do fluxo de concepção e produção, a modelagem 3D tornou-se o ambiente onde esses dados ganham geometria e materialidade virtual, e a fabricação digital passou a executar geometrias complexas com precisão

milimétrica, antes inviáveis pelos métodos tradicionais. Kolarevic (2003) documentou essa transformação ao mostrar que os modelos digitais passaram a ser o elo direto entre projeto e a produção dos protótipos. A modelagem 3D e a captura da realidade por escaneamento ou fotogrametria fornecem os dados que alimentam algoritmos de IA e máquinas de fabricação. A fabricação digital materializa esses arquivos em objetos físicos por meio de impressoras 3D, cortadoras a laser, fresadoras e braços robóticos.

A pesquisa parte de dois problemas interligados. O primeiro é bibliográfico, cuja interseção entre IA, modelagem 3D e fabricação digital aplicada a modelos arquitetônicos resultou em apenas 16 artigos validados em português entre 2020 e 2025. Esse número indica a ausência de fluxos de trabalho documentados para esse campo no contexto nacional. O segundo é metodológico, os fluxos identificados na literatura não distinguem, dentro do modelo digital, o que foi gerado a partir de documentos históricos (fotografias, plantas, registros) do que foi gerado via IA. Essa falta de transparência compromete a rastreabilidade das reconstruções digitais, especialmente em aplicações voltadas ao patrimônio.

Assim, o objetivo principal do estudo é desenvolver um fluxo capaz de gerar modelos 3D físicos a partir da interpretação de artefatos ornamentais históricos, com controle das incertezas e rastreabilidade, fundamentado no método da *Design Science Research* (Dresch; Lacerda; Antunes Júnior, 2015) e integrando IA, modelagem 3D e fabricação digital por meio de uma revisão sistemática da literatura. As etapas gerais que estruturam o desenvolvimento da pesquisa são apresentadas na Figura 1. O recorte em patrimônio arquitetônico justifica-se pela condição de entrada da pesquisa, imagens históricas únicas, em baixa resolução e sem documentação técnica complementar, situação recorrente em acervos brasileiros do século XIX e início do XX, na qual o controle das incertezas torna-se ainda mais necessário.

Metodologia

O procedimento metodológico seguiu as diretrizes da *Design Science Research* (DSR), abordagem voltada à resolução de problemas práticos por meio do desenvolvimento e teste de artefatos. A pesquisa combinou dois procedimentos complementares: uma revisão sistemática da literatura, acompanhada de um levantamento bibliométrico, e um teste piloto aplicado à documentação do patrimônio arquitetônico. O encadeamento geral desses procedimentos é apresentado na Figura 2.

A revisão sistemática foi conduzida no *Google Scholar,* com o recorte temporal de 2020 a 2025, utilizando descritores em inglês, espanhol e português associados por operadores booleanos. A distribuição dos resultados obtidos segundo o idioma e as combinações de palavras-chave é apresentada na Figura 3. O operador "*OR"* uniu sinônimos e variações linguísticas dentro de um mesmo eixo temático, enquanto o operador "*AND"* exigiu a interseção obrigatória entre os eixos. Para eliminar falsos positivos, como resultados voltados à arquitetura de redes neurais, à arquitetura de *software* ou às áreas de medicina e

engenharia de *software*, adotou-se o operador de exclusão "*NOT*", garantindo que os resultados refletissem apenas o cruzamento entre as três tecnologias e a arquitetura. Após a triagem por títulos, resumos e critérios de elegibilidade, a amostra final foi composta por 170 artigos validados, conforme o processo de seleção apresentado no fluxograma PRISMA (Figura 4).

O teste piloto foi realizado sobre o pináculo ornamental da Casa Grande do Engenho Cruzeiro, em Ceará-Mirim (RN), utilizando como única entrada uma fotografia histórica em baixa resolução, sem documentação técnica complementar. As etapas que compuseram o teste piloto são apresentadas na Figura 5. O processo foi dividido em três fases. Na "Fase A" realizada no *ComfyUI*, consistiu no pré-processamento da fotografia (*upscale* e *denoising*), ampliando sua resolução efetiva sem introduzir detalhe artificial. Na "Fase B", empregou-se IA generativa com o modelo *Gemini Flash 3.1* através do *Google AI Studio* gerando, por inferência textual, uma imagem de referência que consolidou a interpretação volumétrica do objeto; já a segmentação para o isolamento do objeto foi feita de forma manual. A "Fase C" estruturou o volume do elemento na ferramenta *Hunyuan3D* e a unificação e limpeza da malha foi feita no *Blender.*

Ao final do processo, o nível de certeza de cada decisão interpretativa foi registrado em Fichas de Hipótese (um exemplo desse registro é apresentado na Figura 6) e incorporado ao modelo através de um sistema de codificação por cores, denominado de modelo de fidelidade geométrica (FG). Foram utilizadas três cores, a cor verde indica geometria fiel à fotografia de entrada, a amarela indica geometria parcialmente inferida, por simetria ou analogia tipológica, nas áreas não cobertas pela foto, por fim a cor laranja, que indica geometria totalmente divergente da fotografia de entrada. Essa classificação foi feita manualmente, por comparação direta entre a imagem de entrada e o modelo gerado, e a proporção de área correspondente a cada cor foi calculada automaticamente por um *script* dentro do *Blender*. Por fim, a malha do modelo foi exportada no formato STL, formato-base lido por impressoras 3D. A impressão foi feita em filamento PLA, com resolução de camada de 0,2mm e três horas de duração.

Resultados e Discussões

Os resultados desta pesquisa são apresentados em duas etapas complementares, Primento os principais achados da revisão sistemática, que mapeiam o contexto tecnológico global e evidenciam as lacunas na produção acadêmica em língua portuguesa. Em seguida, os resultados do teste piloto, que demonstram a viabilidade prática de integração entre IA, modelagem 3D e fabricação digital aplicada à documentação do patrimônio arquitetônico.

A revisão sistemática revelou um efeito de funil característico da literatura científica. Buscados isoladamente, os eixos tecnológicos desta pesquisa retornam volumes expressivos de resultados. "*3D Printing*" supera 500 mil ocorrências em inglês e "*Artificial Intelligence*" ultrapassa 1,6 milhão. Contudo,

ao restringir a busca à interseção direta entre Inteligência Artificial, Fabricação Digital e Arquitetura, esse volume despenca. Em inglês, a combinação "*Machine Learning*" AND "*Additive Manufacturing"* AND "*Architecture*" retornou inicialmente 18.600 artigos. Após o refinamento metodológico que excluiu falsos positivos da Ciência da Computação (como "*neural network*" e "s*oftware architecture*"), restaram apenas 329 publicações.

Em português, a interseção dos quatro eixos temáticos ("Inteligência Artificial" AND "Modelagem 3D" AND "Fabricação Digital" AND "Arquitetura") resultou em apenas 74 artigos nos últimos cinco anos. Em espanhol, a busca equivalente resultou em 276 publicações. Essa disparidade mostra que a pesquisa em língua ingles define as nomenclaturas técnicas do campo. O pesquisador brasileiro precisa adaptar a terminologia para dialogar com as inovações internacionais.

A aplicação do protocolo de busca resultou na identificação inicial de 521 registros brutos (inglês n=171, espanhol n=276, português n=74). Conforme o fluxograma PRISMA (Figura 4), apresentado anteriormente, a leitura exploratória de títulos e resumos eliminou 200 registros classificados como falsos positivos, majoritariamente de medicina, engenharia de software e ensino básico. A leitura aprofundada eliminou mais 26 registros, restando 295 para a fase de elegibilidade, da qual foram excluídas 125 publicações sem aplicação prática no ambiente construído. Ao final, resultou em 170 artigos plenamente validados, revelando uma assimetria de publicações. Foram retidos 84 artigos em inglês, 70 em espanhol e somente 16 em português. Esses números confirmam a predominância técnica internacional e a disparidade da produção científica sul-americana no cruzamento entre as três tecnologias e a arquitetura.

O teste prático interpretou o pináculo ornamental da casa-grande do Engenho Cruzeiro (RN), tendo como fonte primária uma fotografia histórica de 1999, apresentada na Figura 7, sem vistas laterais. Foi ampliado os detalhes reais do pináculo sem gerar alucinações visuais através de *upscale* e *denoising*, e a IA generativa produziu o volume estrutural para o modelo tridimensional. O uso do *Google AI Studio* se deve ao fato de poder controlar a temperatura de geração, quando mais baixa, reduz a ocorrência de alucinações visuais. O render de referência produzido nessa etapa é apresentado na Figura 8. O *Hunyuan3D* gerou o volume 3D com base na imagem gerada na fase anterior.

O produto final do experimento consistiu no modelo de Fidelidade Geométrica (FG), que utiliza a cor verde para evidenciar o que a imagem primária comprovou (atingindo 60% da superfície do objeto), e a cor amarela para partes cuja geometria precisou ser parcialmente inferida por simetria ou analogia tipológica, a exemplo da vista traseira não captada pela foto (totalizando 40%). Por fim, nenhuma superfície recebeu a cor laranja, que representaria incompatibilidade total. Esse resultado é compatível com a geometria relativamente simples do objeto. A representação espacial desses níveis de certeza no modelo é apresentada na Figura 9.

A malha foi exportada em STL (formato de arquivo utilizado para representar a geometria de modelos tridimensionais) e impressa em filamento PLA, com resolução de camada de 0,2 mm e três horas de duração. O modelo físico resultante da impressão 3D é apresentado na Figura 10. A comparação entre a fotografia histórica de entrada e o modelo físico impresso confirma o êxito da metodologia. O método foi capaz de traduzir, em um objeto físico, a silhueta e a ornamentação presentes na única fonte disponível. O modelo físico também

amplia o acesso ao patrimônio. Ele é útil para o ensino de arquitetura e para pessoas com deficiência visual, que podem reconhecer a forma do elemento pelo tato. Isso aproxima o patrimônio arquitetônico de públicos que normalmente não têm acesso a ele.

Conclusão

Os dados da revisão sistemática e do teste piloto convergem para um mesmo diagnóstico, embora sob perspectivas distintas. A integração entre inteligência artificial (IA), modelagem 3D e fabricação digital já está estabelecida na literatura internacional, mas ainda não dispõe de metodologias padronizadas e protocolos replicáveis na produção brasileira, sobretudo no campo patrimonial. Os 16 artigos em português confirmam a existência desse campo de pesquisa, mas indicam que ele ainda não reúne produção científica suficiente para consolidar fluxos metodológicos.

Nesse contexto, o termo "falso histórico" designa uma reconstrução digital na qual a geometria inferida por IA é apresentada, implícita ou explicitamente, como se constituísse dado documental comprovado, sem qualquer marcação que permita ao observador distinguir entre informação documentada e informação inferida. O teste piloto demonstra que esse risco pode ser controlado. A incorporação da variante FG e das Fichas de Hipótese tornou explícito, em cada superfície do modelo, o que foi confirmado pela fotografia e o que resultou de inferências por simetria ou analogia tipológica. Assim, a pesquisa indica que o uso de IA não produz falso histórico de forma automática. O risco surge quando os resultados da inferência são apresentados sem rastreabilidade ou sem a explicitação de seus níveis de incerteza. Quando esses controles são incorporados ao fluxo de trabalho, a IA pode contribuir para a documentação patrimonial de forma controlada e rastreável.

Do ponto de vista prático, o teste piloto também evidencia a possibilidade de desenvolvimento de fluxos acessíveis. As ferramentas empregadas foram *ComfyUI, Google AI Studio, Hunyuan3D* e *Blender*, todas de acesso aberto ou gratuito. Isso demonstra que a integração entre IA, modelagem 3D e fabricação digital pode ser implementada sem a necessidade de infraestrutura de alto custo.

O protótipo físico resultante contribuiu para a validação do fluxo metodológico proposto e também possui potencial para a disseminação do patrimônio arquitetônico. Sua utilização pode ampliar o acesso ao objeto estudado, especialmente no ensino de arquitetura e para pessoas com deficiência visual, que podem reconhecer pelo tato características formais do elemento reconstruído.

A metodologia desenvolvida demonstra que a integração entre IA, modelagem 3D e fabricação digital pode contribuir para a documentação e a reconstrução de elementos do patrimônio arquitetônico a partir de fontes históricas limitadas, desde que as hipóteses e os níveis de incerteza sejam explicitamente registrados no modelo. O teste piloto confirmou a viabilidade do fluxo proposto e evidenciou seu potencial para ampliar o acesso ao patrimônio por meio da representação digital e da fabricação de modelos físicos.

Referências

BACALU, C. M. **Automation & customization**: rethinking precast design with robotics and modular systems. 2025. Master's thesis — Carleton University, 2025. DOI: https://doi.org/10.22215/etd/2025-16630.

BARROS, N. P. **Potencialidades e desafios da tecnologia de impressão 3D na construção civil:** estudo de caso comparativo entre duas residências localizadas no Brasil e na África. 2022. Trabalho de conclusão de curso — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2022.

BRITO, B. L. de. **Envoltórios arquitetônicos complexos**: avaliação sistêmica de parâmetros de construtibilidade. 2025. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, 2025.

CARPO, M. **The second digital turn**: design beyond intelligence. Cambridge, MA: MIT Press, 2017.

CAVALCANTE, C. S. C. **Indústria 4.0 na pré-fabricação**: modelo de maturidade e quadro atual de desenvolvimento tecnológico de fabricantes da construção industrializada. 2023. Dissertação (Mestrado Profissional) — Universidade de São Paulo, 2023.

CONDORELLI, F. **From one picture to lost play**: reviving ancient games with artificial intelligence for digital heritage conservation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XLVIII-M-9-2025, p. 361–368, 2025. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-9-2025-361-2025.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. **Design science research**: método de pesquisa para o avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015.

FAGUNDES, C. V. M. **Favo paramétrico**: modelagem tridimensional por inteligência artificial. 2025. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2025.

FIGUEIREDO, L. A. L. T. **Fronteiras da criatividade**: interferências da inteligência artificial na prática da arquitetura. 2023. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, 2023.

FLORES, D. A. N. **BIM evolucionário**: aplicabilidade de algoritmos de inteligência artificial no desenvolvimento de projetos de edificações. 2021. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

GOMES, L. G. de O.; PEREIRA, A. F. **Inteligência artificial e projetos AECD**: mapeamento para aplicação de IA. Anais, p. 733–744, 2023.

KANTAROS, A.; GANETSOS, T.; PALLIS, E.; PAPOUTSIDAKIS, M. **Biomimetic additive manufacturing**: engineering complexity inspired by nature's simplicity. Biomimetics, v. 10, n. 7, p. 453, 2025.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age**: design and manufacturing. New York: Taylor & Francis, 2003.

LIU, Z. **Integration of digital manufacturing technology and traditional crafts in contemporary environmental design**. Communications in Humanities Research, v. 72, p. 19–26, 2025.

MEMON, S. A.; SHEHATA, W.; ROWLINSON, S.; SUNINDIJO, R. Y. **Generative artificial intelligence in architecture, engineering, construction, and operations: a systematic review**. Buildings, v. 15, n. 13, p. 2270, 2025.

MENGES, A. (ed.). **Material synthesis**: fusing the physical and the computational. Architectural Design, v. 85, n. 5, 2015.

MINETTO, C. **Otimização de projeto de construção modular com o uso de inteligência artificial**. 2024. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2024.

MOINI, R.; RABIEI, M. Extrusion under material uncertainty with pressure-based closed-loop feedback control in robotic concrete additive manufacturing. Automation in Construction, v. 180, art. 106494, 2025.

QUINTELLA, I. P. C. P.; FLORÊNCIO, E. Q. **O uso de braços robóticos aplicados à manufatura aditiva em concreto**: inovação do design à fabricação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024. Anais [...]. 2024.

SCHEEREN, R. **Fabricação digital na América do Sul**: laboratórios, estratégias, processos e artefatos para o design, a arquitetura e a construção. 2021. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2021.

SOUZA, A. de M. **Arquitetura do século XIX em Ceará-Mirim**. 1999. Trabalho de conclusão de curso de graduação — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1999.

TAFAZZOLI, M.; SHRESTHA, K.; DANG, H. **Investigating barriers to the application of automation in the construction industry.** In: CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS, 2024. Proceedings [...]. [S. l.]: American Society of Civil Engineers, 2024. p. 941–950.

VIANA, A. L. J. **A arquitetura industrializada e a fabricação digital**: uma reflexão sobre os fatores de influência das transformações na indústria da construção civil. 2024. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2024.

Anexos



Figura 1 - Etapas metodológicas da pesquisa



Figura 2 - Fluxograma do método geral



Figura 3 - Quantitativo de publicações por idioma e combinação de palavras-chave (2020-2025)



Figura 4 - Fluxograma PRISMA para validação dos artigos



Figura 5 - Fluxograma do Teste Piloto



Figura 6 - Ficha de Hipótese FH-PN-01



Figura 7 - Fotografia histórica do pináculo ornamental



Figura 8 - Render de referência gerado pelo Google AI Studio



Figura 9 - Modelo de Fidelidade Geométrica com certeza documental codificada



Figura 10 - Modelo físico de visualização

CÓDIGO: HS0346

AUTOR: ISABELLE REVOREDO DOS SANTOS

ORIENTADOR: DANY GERALDO KRAMER CAVALCANTI E SILVA

TÍTULO: DESAFIOS PEDAGÓGICOS NO ENSINO DE MATEMÁTICA: UM ESTUDO COM PROFESSORES DOS ANOS INICIAIS EM TIBAU DO SUL/RN

Resumo

Este estudo analisa os desafios pedagógicos no ensino da Matemática nos anos iniciais do Ensino Fundamental em Tibau do Sul/RN. Trata-se de uma pesquisa de campo de abordagem quanti-qualitativa, realizada com 56 professores da rede pública municipal, por meio da aplicação de questionários. A amostra revelou predominância do sexo feminino (75%), com formação em nível de especialização lato sensu (41,07%), embora 30,36% dos participantes tenham avaliado sua formação matemática inicial como fraca. Os resultados indicam que as maiores dificuldades pedagógicas concentram-se em conteúdos que exigem maior abstração, como Álgebra e Geometria, enquanto as Operações Básicas apresentaram menor índice de dificuldade. Além disso, os dados evidenciam que fragilidades na formação inicial e limitações metodológicas repercutem diretamente na prática docente e na mediação da aprendizagem matemática. Conclui-se que os desafios identificados estão relacionados não apenas às dificuldades individuais dos docentes, mas também a lacunas estruturais da formação acadêmica e às exigências curriculares do ensino de Matemática nos anos iniciais.

Palavras-chave: Ensino de Matemática. Formação docente. Anos Iniciais.

TITLE: PEDAGOGICAL CHALLENGES IN MATHEMATICS TEACHING: A STUDY WITH TEACHERS IN THE EARLY YEARS OF ELEMENTARY SCHOOL IN TIBAU DO SUL, RIO GRANDE DO NORTE, BRAZIL

Abstract

This study analyzes the pedagogical challenges in Mathematics teaching in the early years of Elementary School in Tibau do Sul, Rio Grande do Norte, Brazil. This is a field study with a quantitative-qualitative approach, conducted with 56 teachers from the municipal public school system through the administration of questionnaires. The sample showed a predominance of female participants (75%), with a higher proportion holding lato sensu specialization degrees (41.07%), although 30.36% of the participants rated their initial Mathematics training as weak. The results indicate that the greatest pedagogical

difficulties are concentrated in content requiring a higher level of abstraction, such as Algebra and Geometry, whereas Basic Operations presented the lowest level of difficulty. Furthermore, the data show that weaknesses in initial teacher education and methodological limitations have a direct impact on teaching practice and on the mediation of mathematical learning. It is concluded that the challenges identified are related not only to teachers' individual difficulties, but also to structural gaps in academic training and to the curricular demands of Mathematics teaching in the early years of Elementary School.

Keywords: Mathematics Teaching. Teacher Education. Early Years.

Introdução

A Pedagogia constitui um campo de conhecimento voltado para o estudo dos processos de ensino e aprendizagem, da formação humana e do desenvolvimento educacional em diferentes contextos sociais. Sua contribuição ultrapassa os limites da educação escolar, fornecendo subsídios teóricos e metodológicos para a construção de práticas educativas capazes de promover a aprendizagem de forma significativa, crítica e inclusiva (LIBÂNEO, 2022). Nesse sentido, a Pedagogia desempenha papel fundamental na organização dos processos educativos e na formação integral dos sujeitos, incluindo-se a área da matemática.

No contexto da Educação Básica, este campo do ensino, assume papel relevante por contribuir para o desenvolvimento do letramento matemático, do raciocínio lógico e da capacidade de resolver problemas em diferentes contextos do cotidiano. Nos anos iniciais do Ensino Fundamental, o pedagogo exerce função essencial como mediador da aprendizagem, sendo responsável pela introdução de conceitos fundamentais que servirão de base para a trajetória escolar dos estudantes (BRASIL, 2018). Nessa perspectiva, a qualidade da formação inicial recebida por esse profissional influencia diretamente a segurança docente, as metodologias empregadas e a capacidade de tornar os conteúdos matemáticos acessíveis e significativos aos alunos (GUIMARÃES; TEIXEIRA; ALVES, 2025).

Entretanto, o ensino da Matemática ainda representa um desafio para muitos profissionais da educação. Parte dessas dificuldades está relacionada à formação inicial dos pedagogos e às metodologias adotadas em sala de aula. Guimarães et al. (2025) apontam que a formação acadêmica exerce influência direta na atuação do pedagogo no ensino da Matemática, especialmente no que se refere à segurança conceitual e à condução das práticas pedagógicas.

Nessa mesma direção, Gomes e Palma (2020) evidenciam que a temática das dificuldades de aprendizagem em Matemática ainda recebe atenção limitada em muitos cursos de Pedagogia, o que repercute na preparação dos futuros docentes. Campos, Blanco e Coelho Neto (2022) também destacam a necessidade de fortalecer a formação dos professores que atuam nos anos iniciais, a fim de favorecer práticas pedagógicas mais eficazes no ensino da disciplina.

Alinhados a essa discussão, Viana et al. (2023) identificaram que as dificuldades de aprendizagem em Matemática estão associadas tanto ao processo de ensino quanto às estratégias metodológicas utilizadas. Nessa perspectiva, Silva e Darsie (2024) verificaram que as limitações reconhecidas pelos docentes em sua formação influenciam diretamente sua atuação pedagógica. Ademais, Staub, Pavanello e Bezerra (2025) apontam lacunas na formação inicial no que se refere ao aprofundamento conceitual e à articulação entre teoria e prática, evidenciando a necessidade de fortalecer a preparação dos professores que ensinam matemática.

As discussões sobre o ensino da Matemática também são enriquecidas por diferentes referenciais teóricos. Freire (1996) defende uma aprendizagem baseada no diálogo e na participação ativa dos estudantes. Vygotsky (1998) destaca a importância das interações sociais na construção do conhecimento, enquanto Piaget (1976) enfatiza o papel das experiências e do desenvolvimento cognitivo no processo de aprendizagem. No campo da Educação Matemática, D'Ambrosio (2005) ressalta a valorização dos conhecimentos culturais dos estudantes, e Skovsmose (2001) defende uma educação matemática voltada para a formação crítica e cidadã.

Diante desse cenário, torna-se necessário refletir sobre a formação docente e as práticas pedagógicas no ensino da Matemática, considerando os desafios enfrentados pelos professores e as possibilidades de aprimoramento dos processos educativos. Assim, este estudo teve como objetivo analisar os desafios pedagógicos no ensino da Matemática, buscando identificar as principais dificuldades enfrentadas por docentes dos anos iniciais do Ensino Fundamental no município de Tibau do Sul

Metodologia

CARACTERIZAÇÃO E LOCAL DO ESTUDO

A presente pesquisa foi realizada no município de Tibau do Sul, localizado na região sul do estado do Rio Grande do Norte (RN). De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município possui população estimada em 17.940 habitantes e rede educacional composta por 13 escolas e aproximadamente 126 docentes atuantes. A escolha desse cenário justifica-se pela relevância de compreender as dinâmicas e os desafios específicos enfrentados no ensino da Matemática na rede pública deste município – Figura 1.

POPULAÇÃO DO ESTUDO E COLETA DE DADOS

Os participantes foram 56 profissionais da educação (professores, gestores e auxiliares de sala) atuantes na rede pública municipal de ensino, sendo a coleta de dados realizada por meio de questionário impresso, aplicado presencialmente durante visitas às escolas. Juntamente ao instrumento, foi entregue o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, contendo informações sobre os objetivos da pesquisa, os procedimentos adotados e as garantias de sigilo e anonimato das informações prestadas.

O instrumento de coleta foi elaborado com base nos objetivos da pesquisa e organizado em duas seções principais. A primeira contemplou questões fechadas destinadas à caracterização do perfil dos participantes, incluindo aspectos sociodemográficos, acadêmicos e profissionais. A segunda seção reuniu questões relacionadas à prática docente no ensino da Matemática, com perguntas objetivas organizadas em escala de Likert e questões abertas, permitindo aos participantes expressarem percepções, experiências e dificuldades vivenciadas em sua atuação profissional.

TABULAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados quantitativos foram organizados em planilhas eletrônicas no Google Planilhas e submetidos à análise estatística descritiva, por meio da elaboração de tabelas, gráficos, frequências e percentuais, permitindo caracterizar o perfil dos participantes e identificar tendências observadas nas respostas. Adicionalmente, empregou-se a correlação de Spearman para verificar possíveis associações entre variáveis investigadas, buscando identificar a direção e a intensidade das relações observadas.

Os dados qualitativos provenientes das questões abertas foram analisados por meio de categorização temática, permitindo identificar percepções recorrentes, experiências compartilhadas e desafios comuns relatados pelos docentes. Para garantir o anonimato dos participantes, as respostas foram identificadas por códigos alfanuméricos durante o processo de análise.

Os dados oriundos da pesquisa foram tabulados no software SigmaPlot 15.0, para posterior análise descritiva e com a correlação de Spearman. Esta última possibilita avaliar se há relação entre as variáveis, sendo consideradas estatisticamente relevantes quando $p \leq 0,05$. Este nível de associação é medida pelo coeficiente ρ (rho) ou “rs.”

Resultados e Discussões

Análise descritiva

Na análise dos dados, foi obtido uma amostragem de 56 questionários respondidos, sendo encontrados entre os resultados que a maior parte dos entrevistados foram do sexo feminino (75%), estando em uma faixa etária de 29 a 49 anos (35,71%) com renda familiar de 1 a 2 salários mínimos (28,57%). Com relação ao título acadêmico, o mais predominante entre os docentes foi a especialização (41,07%) cujo tempo de atuação está compreendido entre 1 a 5 anos (48,21%), não possuindo em sua maioria segunda graduação (84,31%). O perfil detalhado dos referidos docentes pode ser consultado na Tabela 1.

A predominância do sexo feminino entre os participantes (75%) reafirma uma característica histórica da docência na Educação Básica, especialmente nos anos iniciais, tradicionalmente marcada pela forte presença de mulheres no exercício da profissão, conforme discutido por Louro (1998). Esse fenômeno está associado à construção social do magistério como uma atividade vinculada ao cuidado e à educação de crianças, o que

contribuiu para a naturalização de determinados papéis de gênero no espaço escolar. Desse modo, a autora aponta que as relações sociais construídas em torno do trabalho docente influenciam diretamente a organização das profissões, refletindo uma configuração histórica que permanece fortemente consolidada no contexto educacional investigado.

Quanto à escolaridade, observa-se que a maior parte dos docentes possui especialização lato sensu (41,07%), seguida de graduação (28,57%), enquanto apenas uma pequena parcela apresenta titulação em nível de mestrado ou doutorado (3,57%). Esses dados indicam uma busca por qualificação após a formação inicial, sobretudo por meio de cursos de pós-graduação lato sensu, aspecto discutido por Gatti (2010) ao analisar as características da formação docente no Brasil, marcada pela ampliação da formação continuada, mas também por fragilidades na consistência dos processos formativos.

Além disso, 84,31% dos participantes informaram não possuir uma segunda graduação, o que sugere que o investimento em formação tem se concentrado mais na verticalização da formação inicial, por meio da pós-graduação, do que na diversificação de áreas do conhecimento. Ainda que a busca por especialização possa representar um esforço de qualificação, a baixa proporção de formação stricto sensu pode indicar limitações no aprofundamento teórico e na produção de conhecimento científico no campo educacional, aspecto que dialoga com as reflexões de Pimenta (1996) acerca da articulação entre teoria, prática e saberes da docência na formação de professores.

No que se refere à faixa etária, a maior parte dos participantes encontra-se entre 29 e 49 anos (60,71%), o que revela a presença significativa de docentes em fase de consolidação da carreira. Esse dado se articula ao tempo de atuação profissional, uma vez que 48,21% dos participantes possuem entre 1 e 5 anos de docência, evidenciando um grupo ainda em processo de inserção e amadurecimento profissional. Segundo Garcia (2010), o início da carreira docente constitui uma etapa singular, marcada por tensões, desafios e pela necessidade de construção da identidade profissional em meio às demandas concretas do cotidiano escolar.

Diante desse processo de inserção profissional, torna-se imperativo analisar a percepção dos docentes sobre a base matemática recebida em sua trajetória acadêmica e de que maneira essa base formativa repercute em sua atuação profissional, conforme exposto na Tabela 2.

Ao investigar a autopercepção dos participantes sobre a formação matemática recebida no âmbito acadêmico, os dados da Tabela 2 revelam um cenário de alerta e que merece atenção, pois verifica-se que 30,36% dos docentes classificam sua formação matemática inicial como fraca, enquanto 25% afirmam não saber avaliá-la. Em contrapartida, 35,71% consideram essa formação boa e apenas 7,14% a definem como excelente, registrando-se ainda uma resposta nula (1,79%).

Esses dados permitem inferir uma possível relação entre a percepção de fragilidade da formação inicial e as dificuldades enfrentadas na prática pedagógica. Silva e Darsie (2024) destacam que as limitações reconhecidas pelos docentes em sua trajetória universitária tendem a influenciar diretamente sua atuação em sala de aula. Quando o professor não se sente seguro em relação aos fundamentos da disciplina, aumenta a probabilidade de recorrer a práticas mais tradicionais, centradas na repetição de

procedimentos, em detrimento de abordagens investigativas, contextualizadas e participativas. Nessa direção, Skovsmose (2001) defende uma educação matemática comprometida com a formação crítica dos estudantes, o que exige do docente não apenas domínio do conteúdo, mas também condições de mobilizar metodologias que favoreçam a reflexão, a problematização e a construção ativa do conhecimento.

O fato de mais da metade dos participantes terem avaliado sua formação inicial como fraca ou declarar não saber avaliá-la indica que a base formativa recebida em Matemática pode não ter sido suficiente para assegurar domínio conceitual e segurança metodológica no trabalho pedagógico. Esse cenário converge com Staub, Pavanello e Bezerra (2025), que apontam lacunas na formação inicial de professores que ensinam Matemática, especialmente no que se refere ao aprofundamento conceitual e à articulação entre teoria e prática. Também dialoga com Gomes e Palma (2020), ao evidenciar que os fundamentos curriculares da matemática ainda ocupam espaço limitado na formação inicial do pedagogo generalista.

Como desdobramento desse quadro formativo, a percepção de barreiras na prática pedagógica cotidiana torna-se mais evidente. A maioria absoluta dos respondentes, correspondente a 64,29%, declarou enfrentar “alguma dificuldade” no ensino da disciplina, enquanto 17,86% afirmaram ter “muita dificuldade”. Somados, esses percentuais demonstram que mais de 82% da amostra lida com algum nível de entrave didático no ensino da Matemática. Os demais participantes distribuíram-se entre aqueles que não souberam responder (12,50%) e respostas nulas (5,36%).

Esses dados permitem inferir uma clara relação de causa e efeito entre a percepção de fragilidade da formação inicial e as dificuldades enfrentadas na prática pedagógica. Silva e Darsie (2024) destacam que as limitações reconhecidas pelos docentes em sua trajetória universitária tendem a influenciar diretamente sua atuação em sala de aula. Quando o professor não se sente seguro em relação aos fundamentos da disciplina, aumenta a probabilidade de recorrer a práticas tradicionais, centradas na repetição mecânica de procedimentos, em detrimento de abordagens investigativas, contextualizadas e participativas. Nessa direção, Skovsmose (2001) defende uma educação matemática comprometida com a formação crítica dos estudantes, o que exige do docente condições plenas de mobilizar metodologias que favoreçam a reflexão, a problematização e a construção ativa do conhecimento.

Para avaliar como essas dificuldades gerais se manifestam em áreas específicas em sala de aula, a Figura 1 detalha a percepção dos docentes quanto ao nível de dificuldade em quatro eixos centrais da disciplina: Álgebra, Operações Básicas, Raciocínio Lógico e Geometria em sua prática pedagógica.

A Figura 2 ilustra a percepção dos docentes quanto ao nível de dificuldade em tópicos específicos da Matemática (Álgebra, Operações Básicas, Raciocínio Lógico e Geometria) em sua prática pedagógica.

A análise dos dados da Figura 2 indica que as inseguranças docentes não se distribuem de maneira uniforme, concentrando-se sobretudo em conteúdos que exigem maior abstração. O nível de “Muita dificuldade” é visivelmente mais expressivo no eixo de Álgebra, no qual 16,07% dos docentes relatam enfrentar grandes barreiras, enquanto nos demais eixos esse índice permanece abaixo dos 10%.. Em contrapartida, nos eixos de

Raciocínio Lógico e Geometria, esse índice cai para 5,36%, estando ausente no bloco de Operações Básicas.

A categoria 'Dificuldade razoável' apresenta-se de forma bastante homogênea nos blocos de Geometria e Raciocínio Lógico, ambos registrando idênticos 33,93% de professores impactados, seguidos pelo eixo de Álgebra com 41,07%.

No entanto, as Operações Básicas destacam-se novamente como o conteúdo de maior domínio técnico da amostra: a soma das categorias "Pouca dificuldade" (37,50%) e "Nenhuma dificuldade" (53,57%) revela que mais de 91% dos entrevistados manejam esse bloco de conteúdos com segurança pedagógica. Esse dado contrasta fortemente com os demais eixos abstratos (Álgebra, Raciocínio Lógico e Geometria), nos quais os índices de ausência de barreiras ("Nenhuma dificuldade") flutuam timidamente entre 10% e 23%.

Esse panorama evidencia que o perfil de segurança pedagógica dos participantes fragiliza-se em conteúdos que exigem maior transposição didática complexa, como Álgebra e Geometria. Essa assimetria no domínio dos eixos matemáticos reflete o descompasso histórico na formação docente apontado por Santos, Almeida e Lourenço (2025), ao evidenciarem que as matrizes curriculares de Pedagogia tendem a concentrar sua carga horária em discussões metodológicas gerais e funções administrativas, limitando o tempo dedicado ao aprofundamento dos conteúdos conceituais específicos que o professor precisará mediar em sala de aula.

Diante desse cenário, a análise revela que as inseguranças docentes não são uniformes, concentrando-se sobretudo em conteúdos que exigem maior abstração, como Álgebra e Geometria. Tal resultado pode ser interpretado à luz dos limites da formação inicial, especialmente no que se refere à reduzida carga horária destinada aos conteúdos específicos e à atuação de professores polivalentes nos anos iniciais, aspectos que tendem a repercutir na apropriação conceitual e na transposição didática desses saberes (OLIVEIRA et al., 2026, em diálogo com a literatura sobre formação docente).

Essa discussão ganha contornos ainda mais complexos quando considerada à luz da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), a qual orienta o trabalho obrigatório com diferentes unidades temáticas da Matemática desde os anos iniciais — como Números, Álgebra, Geometria, Grandezas e Medidas e Probabilidade e Estatística — e demanda do professor não apenas o domínio técnico desses eixos abstratos, mas também a capacidade de articulá-los pedagogicamente de forma significativa no processo de ensino e aprendizagem (BRASIL, 2018).

Nessa perspectiva, as dificuldades observadas não devem ser compreendidas apenas como limitações individuais, mas como expressão de lacunas formativas que repercutem diretamente na prática pedagógica e no atendimento às exigências curriculares contemporâneas, especialmente no que se refere ao ensino de conteúdos que demandam maior nível de abstração e mediação didática (OLIVEIRA et al., 2026; BRASIL, 2018).

Essa exigência de articulação pedagógica ganha contornos mais nítidos quando analisadas as respostas abertas dos docentes, que revelam as estratégias e os nós críticos vivenciados no cotidiano escolar.

Ao serem questionados sobre as barreiras específicas por conteúdos (C1), os professores reafirmaram a Álgebra como o principal gargalo didático isolado, representando 23,91% das menções recorrentes. Embora uma parcela expressiva das respostas tenha se dispersado ou se omitido na categoria Outros / Em branco (63,05%), a proeminência desse eixo abstrato ajuda a compreender o recuo metodológico observado na abordagem inicial (C2), na qual 15,22% dos participantes admitiram que simplesmente "não introduzem" ou “não contextualizam” determinados temas complexos em suas aulas. Esse dado é preocupante, pois a omissão de unidades temáticas obrigatórias compromete a progressão das habilidades previstas na BNCC, gerando um efeito cascata de defasagem nos anos subsequentes.

Por outro lado, quando os docentes buscam enfrentar o desafio de introduzir os conteúdos (C2), a maior preocupação reside em promover a "aplicação no cotidiano" (19,57%) e em "transmitir de forma prazerosa" (6,52%), enquanto as demais respostas dispersas somaram 58,69%. Essa busca pelo cotidiano dialoga estreitamente com a Etnomatemática de D'Ambrosio (2005), que defende a valorização das raízes culturais e das experiências vivenciais dos alunos como ponto de partida para a formalização do saber matemático.

No entanto, essa intenção pedagógica esbarra diretamente na escassez ou na não utilização de recursos didáticos concretos (C3). Constatou-se que a resposta majoritária entre os professores foi a de que "não utilizaram recursos extras" (26,09%), superando o "uso de jogos" (19,57%) e do tradicional "Material Dourado" (4,35%), restando 50% de abstenções ou respostas variadas. A ausência de materiais manipuláveis reforça o alto grau de abstração e a complexidade conceitual frequentemente associados à disciplina, contrariando as premissas de Piaget (1976), para quem o desenvolvimento cognitivo da criança nos anos iniciais depende fundamentalmente da ação concreta sobre objetos para a consolidação de conceitos lógicos.

Por fim, ao projetarem demandas para futuras formações (C4), os docentes sinalizam a necessidade urgente de aprender a trabalhar a Matemática de "forma lúdica" (10,87%), alinhada à "Educação Inclusiva" (6,52%) e voltada ao "Ensino Infantil" (4,35%), embora o maior índice pertença aos que não souberam responder ou indicaram temas isolados (78,26%). Esses índices convergem diretamente com os apontamentos de Staub, Pavanello e Bezerra (2025), que identificam lacunas severas na preparação inicial de professores generalistas no que tange ao aprofundamento conceitual e metodológico.

A expressiva taxa de rejeição ou dúvida sobre a própria formação indica que as estruturas curriculares das licenciaturas têm dedicado atenção limitada à didática específica da Matemática, um fenômeno amplamente debatido por Gomes e Palma (2020).

Buscando identificar a existência de correlações entre os dados acima, foi utilizada a análise de Spearman, tratando-se de um relacionamento linear representado pelo coeficiente de Spearman varia de –1 a +1. E pode ser interpretado como uma relação inversamente proporcional, para os valores negativos, correlação inexistente quando $\rho = 0$ e diretamente proporcional quando valores positivos. Assim, quando o ρ (rho) for negativo uma variável aumenta seu valor em detrimento a outra, por outro lado, quando ρ (rho)for positivo, ambas aumentam o valor, demonstrando uma relação direta (Al-Hameed, 2022).

Correlação de Spearman

Esta correlação objetiva-se observar a relação linear entre variáveis do estudo, onde o coeficiente ρ (rho) varia de –1 a +1, ou seja, quando for negativo uma variável aumenta seu valor em detrimento a outra (inversamente proporcional), enquanto for positivo, ambas aumentam o valor conjuntamente (diretamente proporcional) (Al-Hameed, 2022).

As correlações observadas no presente estudo (Quadro 1), demonstram a relação entre cargo (vínculo) e maior dificuldade profissional (ρ = -0,263). Já a faixa etária apresentou correlação com as variáveis Maior dificuldade profissional (ρ = 0,352) e Como buscou resolver dificuldades (ρ = 0,0908). Outrossim, o item o Tempo conclusão da graduação teve correlação com os itens: Maior dificuldade profissional (ρ = 0,336); Avaliação de matemática na formação (ρ = 0,460) e Dificuldade com ensino da matemática? (ρ = 0,245). Quanto às temáticas da matemática, verificou-se relação de Álgebra (ρ = 0,279), Rac. Lógico (ρ = 0,432) e Geometria (ρ = 0,546) com a variável Avaliação de matemática na formação.

A partir da análise das variáveis (Quadro 1), destacam-se as correlações entre a avaliação da formação matemática e os conteúdos de Geometria (ρ = 0,546), Raciocínio Lógico (ρ = 0,432) e Álgebra (ρ = 0,279). Esses resultados sugerem que a percepção dos docentes sobre a qualidade da formação inicial está relacionada às dificuldades encontradas em conteúdos que exigem maior nível de abstração, reforçando os resultados descritivos apresentados anteriormente. Tal achado converge com Guimarães, Teixeira e Alves (2025), que evidenciam a influência da formação acadêmica na atuação dos pedagogos no ensino da Matemática, especialmente quanto ao domínio conceitual e à segurança na condução das práticas pedagógicas. Da mesma forma, Silva e Darsie (2024) destacam que limitações percebidas pelos próprios docentes durante sua formação repercutem na prática educativa, enquanto Staub, Pavanello e Bezerra (2025) apontam lacunas na formação inicial quanto ao aprofundamento dos conteúdos matemáticos e à articulação entre teoria e prática. Esses resultados também dialogam com Gomes e Palma (2020), que ressaltam a necessidade de fortalecer a preparação dos pedagogos para o ensino da Matemática.

Também foram observadas correlações entre o tempo de conclusão da graduação e as variáveis avaliação da formação matemática (ρ = 0,460), maior dificuldade profissional (ρ = 0,336) e dificuldade no ensino da Matemática (ρ = 0,245), indicando que a trajetória formativa pode estar associada à percepção dos docentes sobre sua preparação e aos desafios encontrados no exercício profissional. Da mesma forma, a faixa etária apresentou associação com a maior dificuldade profissional (ρ = 0,352), sugerindo que diferentes momentos da carreira podem influenciar a percepção das dificuldades vivenciadas pelos professores. Embora essas associações sejam predominantemente de baixa a moderada magnitude, elas reforçam a compreensão de Gatti (2010) de que o desenvolvimento profissional ocorre de forma contínua, exigindo atualização permanente e formação continuada para responder às demandas do ensino.

Por fim, a correlação negativa entre o cargo exercido e a maior dificuldade profissional (ρ = –0,263), embora de baixa magnitude, indica que diferentes vínculos ou funções podem influenciar a percepção dos desafios enfrentados na docência. Em conjunto, os resultados evidenciam que as dificuldades no ensino da Matemática não devem ser compreendidas apenas como limitações individuais dos professores, mas como reflexo de fatores relacionados à formação inicial, ao percurso profissional e às condições de atuação docente. Essa interpretação aproxima-se das discussões de Oliveira et al. (2026), que, ao

investigarem docentes de escolas públicas em pequenos municípios potiguares, evidenciaram que limitações formativas, pedagógicas e estruturais repercutem na prática docente. Embora desenvolvido no contexto do ensino de Ciências, o estudo apresenta elementos convergentes com a realidade observada nesta pesquisa, reforçando a necessidade de investimentos em formação continuada e no fortalecimento das práticas de Educação Matemática.

Nessa perspectiva, as dificuldades observadas nos eixos mais abstratos e o expressivo distanciamento do uso de materiais concretos não devem ser compreendidos apenas como limitações individuais. Como bem sinaliza Gatti (2010), esses fatores constituem indícios de lacunas formativas estruturais que repercutem diretamente na prática pedagógica, evidenciando a necessidade premente de investimentos em formação continuada e em ações de apoio pedagógico focadas no fortalecimento da Educação Matemática municipal.

Conclusão

Este estudo permitiu compreender os desafios pedagógicos no ensino da Matemática nos anos iniciais da rede pública de Tibau do Sul/RN. A análise dos dados evidenciou que o nível de segurança docente varia entre os diferentes eixos da disciplina: enquanto as Operações Básicas apresentam menores índices de dificuldade, conteúdos que demandam maior abstração, como Álgebra e Geometria, concentram os maiores níveis de insegurança pedagógica.

Os resultados indicam que essas dificuldades não devem ser compreendidas apenas como limitações individuais dos docentes, mas também como reflexo de fragilidades presentes na formação inicial e nas condições de desenvolvimento da prática pedagógica. O expressivo percentual de participantes que classificam sua formação matemática como fraca, aliado ao elevado número de professores que relatam enfrentar alguma dificuldade no ensino da disciplina, sugere a necessidade de maior aprofundamento teórico-metodológico da Matemática nos cursos de formação de professores, especialmente naqueles voltados à atuação nos anos iniciais do Ensino Fundamental.

Nesse sentido, os achados reforçam a importância de políticas e ações de formação continuada que contribuam para o fortalecimento da prática docente, sobretudo no trabalho com conteúdos de maior abstração e complexidade conceitual. Também evidenciam a necessidade de estratégias de apoio pedagógico capazes de auxiliar os professores na transposição didática dos conteúdos matemáticos, em consonância com as demandas da Base Nacional Comum Curricular.

Por fim, conclui-se que a melhoria do ensino da Matemática nos anos iniciais requer não apenas o enfrentamento das dificuldades individuais dos professores, mas também a valorização de processos formativos mais consistentes, articulados à realidade escolar e às especificidades do trabalho pedagógico com a disciplina. Dessa forma, espera-se que os resultados deste estudo possam contribuir para a reflexão sobre a formação docente e para o planejamento de ações que favoreçam uma aprendizagem matemática mais significativa no contexto da escola pública.

Referências

AL-HAMEED, K. A. I. Spearman's correlation coefficient in statistical analysis. International Journal of Nonlinear Analysis and Applications, v. 13, n. 1, p. 3249-3255, 2022.

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília: MEC, 2018. Disponível em:http://basenacionalcomum.mec.gov.br/.

CAMPOS, Daniela; BLANCO, Márcia Bernadete; COELHO NETO, João. Um mapeamento sobre o ensino de matemática nos anos iniciais do ensino fundamental.Revista Inova Ciência & Tecnologia, Uberaba, v. 8, n. esp., p. 74-84, 2022.

CURI, Edda. A matemática e os professores dos anos iniciais. São Paulo: Musa Editora, 2005.

D'AMBROSIO, Ubiratan. Educação matemática: da teoria à prática. Campinas: Papirus, 1996.

FREIRE, Paulo. Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

GARCIA, Carlos Marcelo. O professor iniciante, a prática pedagógica e o sentido da experiência. Revista Brasileira de Pesquisa sobre Formação Docente, Belo Horizonte, v. 3, n. 3, p. 11-49, 2010.

GATTI, Bernardete Angelina. Formação de professores no Brasil: características e problemas. Educação & Sociedade, Campinas, v. 31, n. 113, p. 1355-1379, out./dez. 2010.

GOMES, Sandra Monteiro; PALMA, Rute Cristina Domingos. Dificuldades de aprendizagem em matemática: temática ausente na formação inicial do pedagogo. REAMEC – Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática, Cuiabá, v. 8, n. 2, p. 1-21, 2020.

GUIMARÃES, Lorrayne Cássia da Costa; TEIXEIRA, Priscila Greyce Lima; ALVES, Osvando dos Santos. A influência da formação acadêmica na atuação dos pedagogos no ensino de matemática nos anos iniciais. Revista Contemporânea, v. 5, n. 12, p. 1-22, 2025. DOI: 10.56083/RCV5N12-130.

LIBÂNEO, José Carlos. Pedagogia e pedagogos, para quê? 13. ed. São Paulo: Cortez, 2022.

LOURO, Guacira Lopes. Gênero, sexualidade e educação: uma perspectiva pós-estruturalista. 2. ed. Petrópolis: Vozes, 1998.

MATOS, Diego de Vargas; LARA, Isabel Cristina Machado de. Convergências e divergências entre o ensino de matemática na licenciatura em pedagogia e nos anos iniciais do ensino fundamental. Revista Insignare Scientia, Chapecó, v. 6, n. 5, p. 245-265, 2023.

OLIVEIRA, Yanka Silva de; SOUSA, Anésio Mendes de; CAVALCANTI JÚNIOR, Geraldo Barroso; PEREIRA, Nathalie de Sena; SILVA, Dany Geraldo Kramer Cavalcanti e. Análise dos desafios do ensino de ciências entre docentes de escolas públicas em pequenos municípios potiguares. Revista de Estudos Interdisciplinares, v. 8, n. 2, p. 1-15, mar./abr. 2026. DOI: 10.56579/rei.v8i2.2591.

PIAGET, Jean. A equilibração das estruturas cognitivas: problema central do desenvolvimento. Rio de Janeiro: Zahar, 1976.

PIMENTA, Selma Garrido. Formação de professores: saberes da docência e identidade do professor. Revista da Faculdade de Educação, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 72-89, jul./dez. 1996.

SANTOS, Hosana da Silva Lobo; ALMEIDA, Marcelo Rubens Braga; LOURENÇO, Janes Carla Mota. Dificuldades no aprendizado de matemática: culpa dos pedagogos?! Revista Faculdade Filos, Águas Lindas de Goiás, v. 1, p. 18-24, 2025

SILVA, Renata Aparecida da; DARSIE, Marta Maria Pontin. Dificuldades de aprendizagem em matemática (DAM): concepções de professoras que ensinam matemática nos anos iniciais do ensino fundamental. Revista Even. Pedagóg., Sinop, v. 15, n. 1, p. 164-180, 2024.

SKOVSMOSE, Ole. Educação matemática crítica: a questão da democracia. Campinas: Papirus, 2001.

STAUB, Joel; PAVANELLO, Regina Maria; BEZERRA, Renata Camacho. A formação inicial do professor que ensina matemática nos anos iniciais: uma pesquisa bibliográfica. Acta Scientiarum. Education, Maringá, v. 47, e62802, 2025.

VIANA, Ana Paula Leite; SOUSA, Ana Clara Rodrigues; SILVA, Maria Eduarda Santos; et al. As dificuldades de aprendizagem da matemática na educação infantil e ensino fundamental anos iniciais: uma revisão bibliográfica. Revista Foco, Curitiba, v. 16, n. 11, p. 1-18, 2023.

VYGOTSKY, Lev Semenovich. A formação social da mente. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

Anexos



Figura 1 - Representação geográfica do município de Tibau do Sul/RN. Fonte: Souza (2021, p.145).



Tabela 1 - Dados socioeconômicos dos educadores da rede municipal de Tibau do Sul/RN. Fonte: Autores (2026)



Tabela 2 - Distribuição das respostas sobre a formação matemática inicial e o nível de dificuldade na prática docente em Matemática. Fonte: Autores (2026)



Figura 2 - Distribuição do nível de dificuldade dos docentes em diferentes áreas da Matemática. Fonte: Autores (2026)



Tabela 3 - Distribuição de frequência das respostas dos docentes sobre os desafios pedagógicos e metodológicos no ensino da Matemática. Fonte: Autores (2026)



Quadro 1– Análise de correlação de Spearman entre variáveis do estudo. Fonte: Autores (2026)

CÓDIGO: HS0446

AUTOR: RAILANNE DE LIMA PAULINO

ORIENTADOR: EMANUEL RAMOS CAVALCANTI

TÍTULO: Estudos de caso a partir da matriz tipológica dos pequenos municípios potiguares da Mesorregião Agreste Potiguar (MAP)

Resumo

Os pequenos municípios representam um contingente significativo no cenário nacional e regional, representando 94,27% do total do país e 97,6% no estado do Rio Grande do Norte. Embora apresentem um percentual significativo, o Estatuto da cidade (2001) não apresenta instrumentos efetivos que contemplem a realidade heterogênea desses municípios. Nesse sentido, a pesquisa tem como objetivo contribuir com os processos de implementação do planejamento e da gestão urbana e regional no marco do Estatuto da Cidade (2001) e da obrigatoriedade de elaboração de plano diretor a partir dos limites e dificuldades dos pequenos municípios brasileiros. Os resultados desta etapa da pesquisa se deteve sobre a análise dos principais instrumentos utilizados no planejamento territorial, onde verificou-se a maior incidência da Lei de perímetro urbano seguido pela Lei de parcelamento do solo. Também revelou-se a pouca incidência em legislações referentes ao uso especial para fins de moradia, sobre usucapião especial de imovel urbano, sobre direito de superfície e legitimação de posse. Como resultados referentes à classificação tipológica dos municípios, foram definidas variáveis organizadas em uma tabela para análises posteriores. Desse modo, os dados sintetizados irão nortear a formulação das tipologias futuras e futuros estudos acerca do tema do planejamento territorial nos pequenos municípios.

Palavras-chave: Pequenos municípios, Plano Diretor, Estatuto da Cidade, Planejamento

TITLE: Case studies based on the typological matrix of small Potiguar municipalities in the Agreste Potiguar Mesoregion (MAP)

Abstract

Small municipalities represent a significant portion of both the national and regional scenarios, accounting for 94.27% of the country's total and 97.6% in the state of Rio Grande do Norte. Although they represent a significant percentage,

the City Statute (2001) does not provide effective instruments that address the heterogeneous reality of these municipalities. In this regard, the research aims to contribute to the implementation processes of urban and regional planning and management within the framework of the City Statute (2001) and the mandatory preparation of master plans, considering the limitations and difficulties faced by small Brazilian municipalities. The results of this stage of the research focused on the analysis of the main instruments used in territorial planning, which revealed the highest incidence of the Urban Boundary Law, followed by the Land Subdivision Law. It also revealed a low incidence of legislation regarding special concession of use for housing purposes, special urban adverse possession, surface rights, and possession legitimation. Regarding the results related to the typological classification of the municipalities, variables were defined and organized in a table for subsequent analysis. Thus, the synthesized data will guide the formulation of future typologies and future studies on the subject of territorial planning in small municipalities.

Keywords: Small municipalities, Master Plan, City Statute, Planning.

Introdução

INTRODUÇÃO

De acordo com a classificação do IBGE (2016), são considerados pequenos municípios aqueles que possuem população menor que 100.000 habitantes, que representam uma parcela significativa no contexto nacional e regional. No cenário nacional, essa classificação corresponde a 94,27% do total, ao ressaltar o Estado do Rio Grande do Norte, 97,6% dos 167 enquadram-se nessa classificação. Dentre estes, a grande maioria possui população menor que 20.000 habitantes, correspondendo ao percentual de 85,3% no estado. Nesse cenário, constata-se a necessidade de se pensar na representatividade e planejamento desses municípios dada sua importância no contexto nacional e estadual.

O Estatuto da Cidade (EC), Lei no 10.257 de 2001, se consolidou como marco normativo do planejamento territorial, consolidando marcos fundamentais, como a importância do planejamento territorial integrado e participação popular. Contudo, os instrumentos presentes na legislação foram pensados a partir da lógica das grandes e médias cidades, não contemplando de forma eficaz a realidade heterogênea dos pequenos municípios.

Conforme a Divisão Regional do Brasil divulgada pelo IBGE, em 1990, divisão adotada nesta pesquisa, o estado do Rio Grande do Norte está subdividido em quatro Mesorregiões: Agreste, Leste, Central e Oeste. O plano de pesquisa teve como recorte geográfico a Mesorregião Agreste Potiguar (MAP), composta na sua totalidade por pequenos municípios, 43 no total, sendo 88% destes abaixo de 20.000 habitantes (38 municípios) e apenas 12% entre 20.000 e 100.000 habitantes (cinco municípios). A utilização deste parâmetro populacional de 20.000 habitantes está relacionada à obrigatoriedade ou não de plano diretor, conforme o EC.

O objetivo da pesquisa consiste em contribuir com os processos de implementação do planejamento e da gestão urbana e regional no marco do Estatuto da Cidade (2001) e da obrigatoriedade de elaboração de plano diretor a partir dos limites e dificuldades dos pequenos municípios brasileiros.

Este relatório foi estruturado em quatro partes: esta introdução, aspectos metodológicos, resultados e considerações finais. A primeira parte dos resultados se deteve sobre os instrumentos de planejamento territorial utilizados e o segundo sobre os critérios utilizados para a definição das tipologias.

Metodologia

METODOLOGIA

A pesquisa tem abordagem qualitativa e possui natureza aplicada. Como métodos e técnicas partiu-se da síntese de etapas anteriores que analisou dados quantitativos e qualitativos, quanto à aspectos sociodemográficos, econômicos e legislação de planejamento dos municípios.

Os dados foram levantados de forma indireta através de meios digitais. Para a obtenção de dados demográficos e de legislação municipal obteve-se como fonte o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), por meio da Pesquisa de Informações Básicas Municipais (MUNIC), de 2021 e Censo Demográfico de 2022. Para os dados referentes ao índice de Gini, do ano de 2010, utilizou-se a plataforma digital do DataSus. Além disso, foram analisadas informações disponibilizadas pelo Instituto Cidades Sustentáveis, do ano de 2024, que avaliaram os níveis relativos ao IDSC (Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades). Por fim foram analisados os dados disponibilizados pelo estudo "Tipologia Regionalizada dos Espaços Rurais Brasileiros" desenvolvido por Bitoun e Miranda (2017) no qual os autores classificam os espaços rurais brasileiros em 26 tipos regionalizados com base em critérios sócio demográficos e ambientais.

Os dados referentes à legislação foram sintetizados através de gráficos e em mapas produzidos através do software Qgis sob o sistema de coordenadas geográficas Datum Sirgas 2000. Para a classificação das tipologias, foi realizada a síntese em tabelas de dados obtidos anteriormente, utilizando-se como base para a definição de variáveis e níveis de análise o estudo “Tipificação de municípios como estratégia para territorialização de políticas habitacionais”, desenvolvido por Máximo, Brasil e Albuquerque (2019). Além disso, foi utilizada a revisão bibliográfica de literatura para embasamento dos dados aferidos.

Resultados e Discussões

RESULTADOS

A partir dos resultados de etapas anteriores da pesquisa, onde partiu-se da síntese de dados referentes à população, finanças públicas e planejamento, foram constatadas correspondências de dinâmicas dos pequenos municípios da MAP com as problemáticas gerais presentes nos pequenos municípios já abordados na literatura. Os dados populacionais revelaram índices predominantemente baixos com relação a critérios de índice de desenvolvimento humano e sustentável. A partir da análise financeira constatou-se fragilidades na arrecadação tributária própria e alta dependência financeira das transferências intergovernamentais. Esta etapa atual da pesquisa avançou no detalhamento acerca do planejamento e da classificação dos municípios em tipologias, visando, essencialmente, discutir e subsidiar as políticas públicas correlatas à temática.

Quanto aos instrumentos utilizados para planejamento territorial, foram realizadas análises tanto gerais, abrangendo os 43 municípios, quanto de forma isolada, separando apenas os municípios que não possuem Plano Diretor, que correspondem a 35 no total.

Nas análises gerais, foi constatado que a lei de perímetro urbano seguida pela lei de parcelamento do solo se constituem como os instrumentos, para além da existência ou não de plano diretor, presentes em 81,4% e 32,6% nos municípios, respectivamente. O menor índice foi encontrado nas legislações sobre uso especial para fins de moradia, sobre usucapião especial de imóvel urbano, sobre direito de superfície e legitimação de posse, todos com a incidência de 11,6% (Figura 1).

Figura 1 - Legislação de planejamento territorial dos municípios da MAP - 2021

Fonte: elaborado no âmbito da pesquisa(2026)

O Plano Diretor, tido como principal instrumento de planejamento territorial, se encontra presente em apenas oito municípios (João Câmara, Monte Alegre, Nova Cruz, Santo Antônio e Santa Cruz), o que representa o percentual de 18,6%. Dentre estes municípios, cinco apresentam obrigatoriedade devido aos critérios populacionais definidos pelo Estatuto da Cidade, que exige a compulsoriedade nos casos de municípios:

> [...] I – com mais de vinte mil habitantes; II – integrantes de regiões metropolitanas e aglomerações urbanas; III – onde o Poder Público municipal pretenda utilizar os instrumentos previstos no § 4o do art. 182 da Constituição Federal; IV – integrantes de áreas de especial interesse turístico; V – inseridas na área de influência de empreendimentos ou atividades com significativo impacto ambiental de âmbito regional ou nacional. VI - incluídas no cadastro nacional de Municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos (Brasil, 2008, 27).

Também foram analisados, de forma separada, quais instrumentos estão presentes nos municípios para além dos planos diretores. Nesses casos, a lei de

perímetro urbano continuou sendo a mais incidente, seguida da de parcelamento do solo (Figura 2). Todavia notou-se que nesse recorte diminuição significativa da presença de legislação ambiental, sobre solo criado, zoneamento ecológico, sobre tombamento, usucapião, direito de superfície, legitimação de solo, indicando que esses instrumentos estão presentes principalmente nos municípios que possuem PD, apresentando fragilidades na utilização de forma isolada.

Figura 2 - Legislação de planejamento territorial dos municípios da MAP sem Plano Diretor-2021

Fonte: elaborado no âmbito da pesquisa (2026)

Para a definição da base das propostas tipológicas foram definidas sete variáveis: a classificação do estudo da Tipologia dos Espaços Rurais Brasileiros, a população municipal, IDHM, IDSC, grau de urbanização, existência e obrigatoriedade do Plano Diretor.

Como variáveis principais para a categorização em níveis, foram utilizadas como base a classificação estabelecida pelo estudo de Bitoun e Miranda (2017), no qual os municípios da MAP foram divididos em dois grandes grupos 1B (Essencialmente Rural e Próximo), com 13 municípios e 2B (Relativamente Rural e Próximo), com 30 municípios. Conforme os autores, a classificação rural e próxima abrange municípios com baixa participação das atividades agropecuárias no valor agregado. A classificação como essencialmente rural e próxima se refere, principalmente, àqueles que têm como características o alto percentual de população residindo em habitat rural.

> A questão central não é separar urbano e rural num outro patamar mas entender a relação entre os lugares habitados no espaço [mais ou menos concentradores de população] e o mundo rural requalificado como espaço social a partir do urbano [não confundido com cidades] (Bitoun e Lage, 2017, p.27).

Como segundo nível de categorização foi utilizado o critério populacional, subdividindo-se em três faixas populacionais: até 10 mil habitantes, de 10 a 20 mil habitantes e acima de 20 mil habitantes. A maioria dos municípios concentrou-se na faixa de até 10 mil habitantes, correspondendo a 27 no total, 11 ficaram na faixa entre 10 a 20 mil e cinco municípios apresentaram população acima de 20 mil habitantes.

Para a análise de questões relacionadas ao planejamento territorial escolheu-se verificar a existência e obrigatoriedade do Plano Diretor, tido como o principal instrumento. Além dos municípios com obrigatoriedade pelo critério populacional, constatou-se a exigência em três municípios por serem integrantes da Região Metropolitana de Natal (RMN) (Bom Jesus, Ielmo Marinho e Vera Cruz). Os dados foram sintetizados em uma tabela (Figura 3) para o cruzamento entre as variáveis e definição posterior das tipologias.

Quando analisado o IDH municipal, os índices variaram entre 0,549 e 0,635, classificando-se entre os níveis baixo e médio. Quanto ao índice de Desenvolvimento Sustentável, que analisa o cumprimento de cada um dos

Objetivos do Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela Agenda 2030, a maioria dos municípios apresentou nível baixo, seguido do nível muito baixo e 2 municípios que apresentaram nível médio. No que se refere ao grau de urbanização, o maior percentual foi encontrado no município de São José do Campestre, com 83,35%, destacam-se também 15 municípios cujo grau de urbanização foi de 0%.

Figura 3 - Planilha de síntese de variáveis

Fonte: elaborado no âmbito da pesquisa (2026)

Conclusão

CONCLUSÃO

Os dados puderam comprovar as fragilidades existentes nos municípios da MAP, considerando que ainda existem municípios sem legislações consideradas básicas para o planejamento territorial, como a definição do perímetro urbano, parcelamento do solo e código de obras. A síntese realizada norteará, futuramente, a formulação das tipologias, que encontrou limitações devido à necessidade de um maior tempo hábil para o cruzamento de dados e análises de critérios.

O estudo busca fundamentar futuras pesquisas sobre o planejamento territorial nos pequenos municípios, principalmente no estado do Rio Grande do Norte. Também pretende-se que os dados da pesquisa fundamentem o planejamento municipal e o desenho de políticas públicas associadas para a MAP, considerando as realidades heterogêneas municipais.

Referências

BITOUN, Jan; MIRANDA, Lívia Izabel Bezerra de. A tipologia regional das ruralidades brasileiras como referência estratégica para a política de desenvolvimento rural. **Raízes: Revista de Ciências Sociais e Econômicas,** [S. l.], v. 35, n. 1, p. 21–33, 2015. DOI: 10.37370/raizes.2015.v35.422. Disponível em: https://raizes.revistas.ufcg.edu.br/index.php/raizes/article/view/422. Acesso em: 28 ago. 2026.

BRASIL. **Estatuto da Cidade**. 3. ed. Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, 2008. 102 p.

MÁXIMO, R.; BRASIL, A. B.; ALBUQUERQUE, C. C. G. Tipificação de municípios como estratégia para territorialização de políticas habitacionais.

Revista Baru - Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos, v. 5, n. 2, p. 162-181, 2019. DOI: https://doi.org/10.18224/baru.v5i2.7072.

Anexos



Figura 1 - Legislação de planejamento territorial dos municípios da MAP - 2021 Fonte: elaborado no âmbito da pesquisa(2026)



Figura 2 - Legislação de planejamento territorial dos municípios da MAP sem Plano Diretor - 2021 Fonte: elaborado no âmbito da pesquisa(2026)



Figura 3 - Planilha de síntese de variáveis Fonte: elaborado no âmbito da pesquisa (2026)

CÓDIGO: HS0621

AUTOR: ESTEFANE SANTOS DO NASCIMENTO

ORIENTADOR: DANY GERALDO KRAMER CAVALCANTI E SILVA

TÍTULO: IMPORTÂNCIA DA PEDAGOGIA E DO ENSINO DA MATEMÁTICA EM ESCOLAS MUNICIPAIS.

Resumo

A formação do pedagogo exerce papel fundamental na qualidade do ensino da Matemática nos anos iniciais da Educação Básica. Este estudo teve como objetivo analisar a importância da Pedagogia e investigar a percepção de professores da rede pública de Vila Flor/RN acerca de sua formação matemática e das dificuldades enfrentadas no exercício da docência. Trata-se de uma pesquisa quanti-qualitativa, realizada com 38 profissionais da educação, por meio de questionários contendo questões objetivas e discursivas. Os dados foram analisados por estatística descritiva e análise temática. Os resultados evidenciaram predominância de profissionais do sexo feminino (94,74%), formação em nível de graduação (52,63%) e percepção positiva da formação inicial em Matemática. Entretanto, observou-se que parte dos docentes (26,32%) ainda apresenta dificuldades no ensino da disciplina, principalmente nos conteúdos de Álgebra e Geometria. Conclui-se que o fortalecimento da formação inicial e a oferta de formação continuada são essenciais para aprimorar as práticas pedagógicas e contribuir para uma aprendizagem matemática mais significativa na Educação Básica.

Palavras-chave: Pedagogia. Formação de professores. Ensino da Matemática.

TITLE: THE IMPORTANCE OF PEDAGOGY AND MATHEMATICS TEACHING IN MUNICIPAL SCHOOLS

Abstract

The training of pedagogues plays a fundamental role in the quality of Mathematics teaching in the early years of Basic Education. This study aimed to analyze the importance of Pedagogy and investigate the perceptions of public school teachers in Vila Flor, Rio Grande do Norte, Brazil, regarding their mathematical training and the difficulties faced in teaching practice. This is a quantitative-qualitative study conducted with 38 education

professionals through questionnaires containing objective and open-ended questions. The data were analyzed using descriptive statistics and thematic analysis. The results showed a predominance of female professionals (94.74%), undergraduate-level education (52.63%), and a positive perception of initial Mathematics training. However, it was observed that some teachers (26.32%) still experience difficulties in teaching the subject, particularly in Algebra and Geometry. It is concluded that strengthening initial teacher education and providing continuing education opportunities are essential to improving pedagogical practices and contributing to more meaningful Mathematics learning in Basic Education.

Keywords: Pedagogy. Teacher Education. Mathematics Teaching.

Introdução

A Educação Infantil constitui etapa decisiva para o desenvolvimento da criança, por iniciar experiências sistematizadas de aprendizagem e convivência social. Nesse contexto, o professor desempenha papel essencial ao criar situações que favoreçam o diálogo, a participação e a construção do conhecimento. Para Freire (1996), ensinar não consiste em transmitir conteúdos prontos, mas em possibilitar ao educando construir o próprio conhecimento de forma crítica e reflexiva, respeitando suas experiências, saberes e realidade e promovendo autonomia e protagonismo.

Entre os profissionais que atuam nessa etapa, destacam-se os pedagogos, cuja formação os prepara para compreender os processos de ensino e aprendizagem, planejar intervenções e acompanhar o desenvolvimento infantil. Investigar sua formação, dificuldades e percepções permite compreender desafios da prática docente e identificar estratégias de melhoria. Libâneo (2022) discute aspectos da formação do pedagogo e sua atuação, destacando a relação entre teoria e prática.

A formação em Pedagogia abrange gestão e fundamentos filosóficos, sociológicos e epistemológicos, além de diferentes áreas do ensino, como Linguagens e Matemática. Entretanto, esta última apresenta, em muitos currículos, espaço reduzido na matriz formativa (OLIVEIRA; ANDRADE, 2021; SANTOS, 2025). Estudos evidenciam dificuldades de estudantes e profissionais para ensinar Matemática. Gomes e Palma (2020) apontam despreparo de graduandos em Pedagogia para lidar com dificuldades dos alunos, enquanto Vilela e Pereira (2019) identificam dificuldades em conteúdos como Geometria e Trigonometria. Somam-se a isso fragilidades metodológicas e na articulação entre teoria e prática, que podem ser influenciadas pelo modelo formativo e pelas metodologias docentes (OLIVEIRA; ANDRADE, 2021).

Esses desafios podem se intensificar em pequenos municípios, devido ao acesso limitado a centros de formação, às jornadas extensas e às dificuldades de transporte. Nesse sentido, estudos sobre o ensino da Matemática em municípios potiguares, como Vila Flor e Tibau do Sul, mostram-se relevantes para o diagnóstico situacional e a proposição de melhorias junto às secretarias municipais de educação.

As mudanças na regulamentação dos cursos de Pedagogia buscaram reorganizar a formação docente, mas não solucionaram problemas históricos, como a indefinição da identidade formativa, a sobreposição entre docência e outras funções pedagógicas, a redução do reconhecimento da Pedagogia como campo científico e o empobrecimento curricular. Nesse cenário, houve expansão expressiva dos cursos na modalidade EaD, atualmente responsável pela maior parte das vagas ofertadas no país (MOREIRA; FRANCO, 2024). Dados do Censo da Educação Superior de 2022 confirmam essa expansão: desde 2018, as matrículas em licenciaturas a distância superam as presenciais, sendo a Pedagogia responsável por aproximadamente 47,8% das matrículas, cerca de 800 mil estudantes (INEP/MEC, 2022).

Atualmente, o curso de Pedagogia possui 3.200 horas, distribuídas em quatro anos, com a formação em Matemática concentrada em dois semestres, por meio de Metodologia do Ensino de Matemática I e II, além de Didática I e II. Diante da extensão dos conteúdos matemáticos dos anos iniciais e da responsabilidade do pedagogo em mediá-los, questiona-se se essa carga é suficiente para sua formação. A formação continuada e o conhecimento da história da Matemática são essenciais à qualificação docente e ao desenvolvimento de metodologias adequadas às necessidades educacionais (SANTOS; ALMEIDA; LOURENÇO, 2025). Assim, este artigo objetiva analisar a importância da Pedagogia na formação para diferentes áreas do conhecimento, especialmente a Matemática, destacando sua contribuição para o desenvolvimento educacional e a melhoria das práticas de ensino.

Metodologia

CARACTERIZAÇÃO E LOCAL DE ESTUDO

A presente pesquisa foi desenvolvida no município de Vila Flor (figura 1), situado na região Leste do estado do Rio Grande do Norte. Segundo informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município possui população estimada de aproximadamente 3.289 habitantes em 2024.

Trata-se de um município de pequeno porte, cuja realidade educacional apresenta características próprias, tornando-se um contexto relevante para investigar os desafios relacionados ao ensino da Matemática na rede pública de ensino. A escolha de Vila Flor De acordo com os dados mais recentes disponíveis da rede municipal e estadual, Vila Flor (RN)possui5 unidades de ensino em funcionamento, sendo4 da rede municipale1 da rede estadual.Como cenário da pesquisa fundamenta-se na necessidade de compreender como aspectos locais, sociais e educacionais influenciam as práticas pedagógicas desenvolvidas pelos docentes. Além disso, o estudo busca contribuir para a reflexão sobre os desafios enfrentados pelos professores no processo de ensino e aprendizagem da Matemática, considerando as especificidades do contexto municipal.

POPULAÇÃO DO ESTUDO, COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

A pesquisa foi realizada no município de Vila Flor (RN) com a participação de 38 profissionais da educação da rede pública de ensino. Entre os participantes, foi feita uma breve apresentação sobre a pesquisa e o intuito da coleta dos dados. Foram reunidos esses profissionais e distribuídos questionários impressos e virtuais para facilitar a maior coleta de dados. Além do questionário foi entregue um termo de consentimento para utilização dos dados com sigilo e responsabilidade com as informações fornecidas.

O questionário utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido de acordo com os objetivos propostos, visando obter informações sobre o perfil dos participantes e sua atuação no ensino da Matemática na Educação Infantil do município de Vila Flor/RN. O instrumento foi dividido em duas partes. A primeira reuniu perguntas fechadas destinadas à identificação das características dos docentes, contemplando aspectos como formação acadêmica, tempo de experiência profissional e informações gerais sobre sua atuação na rede municipal de ensino. A segunda parte abordou questões relacionadas à prática pedagógica, combinando perguntas objetivas, organizadas em escala de Likert, com questões discursivas que permitiram aos professores relatar suas experiências, percepções e desafios enfrentados no cotidiano escolar.

As perguntas objetivas tiveram como finalidade identificar informações referentes à formação inicial e continuada dos docentes, às condições de trabalho, à disponibilidade de recursos didáticos e às principais dificuldades encontradas durante o ensino da Matemática. Já as questões abertas possibilitaram uma análise mais aprofundada da realidade vivenciada pelos participantes, permitindo compreender suas opiniões, estratégias pedagógicas e necessidades relacionadas ao processo de ensino e aprendizagem.

Após a coleta, os dados quantitativos foram organizados em planilhas eletrônicas utilizando o Google Planilhas. Em seguida, realizou-se a análise estatística descritiva, por meio do cálculo de frequências absolutas, frequências relativas e percentuais, cujos resultados foram apresentados em tabelas e gráficos para facilitar sua interpretação. Também foi empregado o coeficiente de correlação de Spearman, com o objetivo de verificar a existência de associações entre as variáveis analisadas e identificar a intensidade das relações observadas.

As informações obtidas por meio das questões abertas foram examinadas por meio da análise temática, procedimento que permitiu reunir respostas semelhantes em categorias representativas, evidenciando os principais aspectos mencionados pelos professores. Para preservar a identidade dos participantes, todas as respostas foram identificadas por códigos alfanuméricos, garantindo o anonimato e a confidencialidade das informações coletadas.

A utilização de uma abordagem quanti-qualitativa possibilitou integrar os resultados estatísticos às interpretações provenientes dos relatos dos docentes, proporcionando uma compreensão mais ampla da realidade do ensino da Matemática na Educação Infantil do município de Vila Flor/RN. Dessa forma, foi possível analisar não apenas os aspectos relacionados à formação e à prática profissional dos professores, mas também compreender como suas experiências e percepções influenciam o desenvolvimento das atividades pedagógicas e os desafios enfrentados no contexto escolar.

Resultados e Discussões

Segundo os dados coletados, foram obtidos 38 questionários respondidos por profissionais da educação da rede pública do município de Vila Flor (RN). Os resultados demonstraram predominância do sexo feminino (94,74%), quanto à formação acadêmica, a maioria possuía graduação completa (52,63%). Em relação ao cargo exercido, os docentes representaram 57,89% da amostra. A análise da faixa etária indicou maior concentração de participantes entre 29 e 49 anos, correspondendo a mais de dois terços do total de respondentes (71,05%). No que se refere à renda familiar, destacou-se o predomínio de profissionais com rendimento de até um salário mínimo (47,37%). Sobre a experiência profissional, verificou-se que 44,74% dos participantes possuíam entre 1 e 5 anos de atuação, em relação à formação em Matemática, a maioria avaliou sua preparação como boa (60,53%), além disso, verificou-se que 81,58% dos participantes não possuíam segunda graduação. A caracterização completa da amostra encontra-se apresentada na Tabela 1.

A caracterização dos participantes evidenciou que o grupo pesquisado foi composto em sua maioria por mulheres, que representaram 94,74% da pesquisa. Esse resultado acompanha o perfil observado nacionalmente na Educação Básica, principalmente na Educação Infantil e nos anos iniciais do Ensino Fundamental, segmentos em que a presença feminina permanece predominante. A literatura aponta que esse fenômeno decorre de fatores históricos e sociais que relacionaram o exercício da docência às atividades de cuidado e formação das crianças, processo conhecido como feminização do magistério (LOURO, 1998). Informações divulgadas pelo Censo Escolar da Educação Básica corroboram esse cenário ao demonstrarem que as mulheres constituem a maior parte do corpo docente brasileiro nessas etapas de ensino (INEP, 2023).

Em outro ponto, o nível de formação, verificou-se que pouco mais da metade dos participantes possuía graduação completa (52,63%), enquanto 28,95% haviam realizado cursos de especialização. A presença de profissionais com formação em programas de mestrado ou doutorado foi reduzida, correspondendo a apenas 2,63% da amostra. Esses resultados indicam que, embora exista investimento na continuidade dos estudos, a qualificação em nível stricto sensu ainda é limitada entre os profissionais investigados. Segundo Gatti (2010), a formação continuada desempenha papel essencial no aperfeiçoamento da prática pedagógica e na atualização dos conhecimentos necessários ao exercício da docência.

Quanto à ampliação da formação acadêmica por meio de outro curso superior, observou-se que a maioria dos participantes (81,58%) informou possuir apenas uma graduação, enquanto 18,42% declararam ter concluído uma segunda formação. Esse resultado sugere que os profissionais têm priorizado cursos de pós-graduação como estratégia de qualificação, em detrimento da obtenção de uma nova graduação. Para Pimenta (1996), o desenvolvimento profissional do professor depende da integração entre conhecimentos científicos, pedagógicos e experiências construídas ao longo da prática docente.

A distribuição etária revelou concentração de participantes entre 29 e 49 anos de idade, faixa que reuniu 71,05% da amostra. Esse perfil demonstra a predominância de

profissionais que se encontram em período de consolidação da carreira, fase caracterizada pelo fortalecimento das competências profissionais e pela ampliação das experiências adquiridas no ambiente escolar.

Em relação ao tempo de atuação, os resultados mostraram que 44,74% dos participantes possuíam entre um e cinco anos de experiência profissional, enquanto 23,68% atuavam há mais de dezesseis anos. A coexistência de profissionais iniciantes e experientes evidencia uma diversidade de trajetórias na rede pública de ensino de Vila Flor, favorecendo a troca de conhecimentos e experiências entre docentes. Conforme destaca Garcia (2010), os primeiros anos da carreira representam um período decisivo para o desenvolvimento profissional, exigindo constante adaptação às demandas da prática educativa.

Outro aspecto identificado refere-se ao tempo de conclusão da graduação. Verificou-se que 36,84% dos participantes ainda estavam em processo de formação superior, ao passo que 28,95% haviam concluído a graduação há mais de dez anos. Esses dados demonstram a presença de profissionais com diferentes percursos formativos, o que contribui para a diversidade de experiências observadas na rede municipal de ensino.

A análise desse conjunto de informações permite compreender o perfil sociodemográfico e acadêmico dos participantes, servindo como base para a interpretação dos resultados relacionados à formação em Matemática e às percepções dos profissionais sobre sua atuação docente, apresentados no gráfico 1.

A avaliação realizada pelos participantes acerca da formação matemática recebida durante a graduação revelou uma percepção predominantemente positiva. Conforme apresentado na Tabela 2, 60,53% dos profissionais classificaram sua formação como boa, enquanto 5,26% a consideraram excelente. Em contrapartida, 18,42% avaliaram essa formação como fraca e 15,79% afirmaram não possuir elementos suficientes para emitir uma avaliação.

Embora a maior parte dos participantes demonstre satisfação com a formação recebida, o percentual de profissionais que consideram sua preparação insuficiente ou que não conseguem avaliá-la merece atenção. Esses resultados sugerem que, para parte dos docentes, a formação inicial pode não ter contemplado de forma satisfatória os conhecimentos matemáticos e as estratégias didáticas necessárias ao exercício da docência. Nesse sentido, Silva e Darsie (2024) ressaltam que fragilidades na formação inicial tendem a repercutir diretamente na prática pedagógica, influenciando a segurança do professor para desenvolver atividades relacionadas ao ensino da Matemática. Da mesma forma, Skovsmose (2001) defende que uma educação matemática de caráter crítico exige profissionais capazes de articular conhecimentos conceituais, metodológicos e reflexivos durante o processo de ensino e aprendizagem.

Os resultados também evidenciaram que a percepção positiva sobre a formação acadêmica não elimina completamente as dificuldades encontradas no cotidiano escolar. Ao serem questionados sobre o ensino da Matemática, 26,32% dos participantes relataram apresentar alguma dificuldade, enquanto 15,79% afirmaram possuir muitadificuldade. Além disso, 28,95% classificaram sua dificuldade como muitadificuldade/pouca, demonstrando diferentes níveis de insegurança diante da

disciplina. Outros 28,95% informaram não saber avaliar seu grau de dificuldade – Gráfico 2.

Esses achados indicam que as dificuldades relacionadas ao ensino da Matemática permanecem presentes mesmo entre profissionais que avaliam positivamente sua formação inicial. Tal resultado reforça a compreensão de que a qualidade da atuação docente depende não apenas da formação recebida na graduação, mas também da participação em processos permanentes de formação continuada e do desenvolvimento de experiências práticas ao longo da carreira. Conforme destacam Staub, Pavanello e Bezerra (2025), persistem lacunas na formação inicial dos professores que ensinam Matemática, especialmente no aprofundamento dos conteúdos específicos e na integração entre teoria e prática pedagógica. De maneira semelhante, Gomes e Palma (2020) apontam que a formação do pedagogo ainda dedica espaço reduzido ao ensino da Matemática, limitando o desenvolvimento de competências necessárias para enfrentar os desafios encontrados em sala de aula.

Diante desses resultados, observa-se que fortalecer a formação matemática dos professores constitui um aspecto fundamental para o aprimoramento das práticas pedagógicas e para a melhoria da aprendizagem dos estudantes. Nesse contexto, torna-se importante identificar em quais conteúdos matemáticos os profissionais encontram maiores dificuldades, permitindo compreender de forma mais específica os desafios enfrentados no exercício da docência. Essas informações são apresentadas na Tabela 2, que reúne a percepção dos participantes sobre os níveis de dificuldade relacionados aos principais eixos da Matemática.

Ao serem questionados sobre o nível de dificuldade em diferentes conteúdos matemáticos, os professores apontaram a Álgebra como o eixo de maior complexidade. Observa-se que 28,95% dos participantes relataram muita dificuldade e outros 28,95% indicaram dificuldade razoável, totalizando 57,90% de percepções de dificuldade nesse conteúdo. Apenas 42,10% afirmaram apresentar pouca ou nenhuma dificuldade, evidenciando que a Álgebra permanece como um dos principais desafios para a prática docente, especialmente por exigirem maior capacidade de abstração e domínio conceitual.

Esses achados corroboram os resultados de Gomes e Palma (2020), que identificaram fragilidades na formação matemática de pedagogos, sobretudo em conteúdos mais abstratos, como Álgebra e Geometria. De forma semelhante, Staub, Pavanello e Bezerra (2025) destacam que a formação inicial dos professores generalistas ainda apresenta lacunas relacionadas ao aprofundamento dos conhecimentos matemáticos e de sua didática, repercutindo diretamente na prática pedagógica.

Em relação às Operações Básicas, verificou-se um cenário mais favorável. A maior parte dos professores (73,68%) declarou possuir pouca ou nenhuma dificuldade, enquanto apenas 26,31% relataram muita ou razoável dificuldade. Esse resultado sugere maior domínio desse conteúdo, provavelmente por fazer parte das habilidades mais recorrentes nos anos iniciais do Ensino Fundamental. Esse resultado demonstra maior segurança dos docentes na abordagem de conteúdos elementares da Matemática, o que também foi observado por Curi (2005), ao afirmar que professores dos anos iniciais tendem a apresentar maior domínio dos conteúdos mais frequentes em sua prática pedagógica.

No eixo de Raciocínio Lógico, predominou a percepção de pouca dificuldade (50,00%), seguida de dificuldade razoável (31,58%). Apenas 7,89% dos docentes afirmaram apresentar muita dificuldade, indicando que, embora existam desafios, esse conteúdo é percebido como menos complexo do que a Álgebra. Esses dados indicam que, embora existam desafios, a maioria dos docentes demonstra domínio satisfatório desse eixo quando comparado aos conteúdos algébricos. Entretanto, a permanência de dificuldades entre parte dos participantes reforça a necessidade de fortalecer a formação matemática durante a graduação e em programas de formação continuada, conforme destacam Staub, Pavanello e Bezerra (2025).

Quanto à Geometria, os resultados demonstram uma distribuição mais equilibrada das respostas. A categoria dificuldade razoável foi a mais frequente (34,21%), enquanto 21,05% dos participantes relataram muita dificuldade, 23,68% pouca dificuldade e 21,05% nenhuma dificuldade. Esses dados convergem com Curi (2005), que destaca que esse conteúdo costuma receber menor atenção na formação inicial dos pedagogos, refletindo em dificuldades durante a prática docente. Ademais, esses dados revelam que a Geometria ainda representa um desafio para parte significativa dos docentes, embora em menor intensidade que a Álgebra.

De modo geral, os resultados evidenciam que Álgebra e Geometria concentram os maiores índices de dificuldade entre os professores, ao passo que Operações BásicaseRaciocínioLógico apresentam maior domínio. Esses achados reforçam a necessidade de ações de formação continuada voltadas, principalmente, ao fortalecimento dos conhecimentos didáticos e conceituais relacionados aos conteúdos matemáticos de maior abstração, contribuindo para a melhoria das práticas pedagógicas nos anos iniciais. Esses achados concorrem com as evidências apresentadas por Gatti (2010), que atribui parte dessas dificuldades às fragilidades presentes na formação inicial dos professores, especialmente nos cursos de Pedagogia, onde a carga horária destinada aos conteúdos específicos de Matemática costuma ser insuficiente. Da mesma forma, Curi (2005) destaca que a limitada preparação matemática dos pedagogos compromete a segurança para ensinar conteúdos mais complexos, reforçando a necessidade de investimentos em formação continuada que fortaleçam tanto o conhecimento matemático quanto às estratégias metodológicas de ensino.

Conclusão

Portanto, a pesquisa permitiu compreender o perfil dos profissionais da educação de Vila Flor/RN e identificar aspectos relevantes relacionados à formação e ao ensino da Matemática. Os resultados demonstraram que, embora a maioria dos docentes avalie positivamente sua formação inicial, persistem dificuldades em conteúdos específicos, sobretudo Álgebra e Geometria, evidenciando limitações que podem influenciar o processo de ensino e aprendizagem. Dessa forma, torna-se necessário fortalecer a formação inicial dos cursos de Pedagogia, ampliando a carga horária destinada aos conteúdos matemáticos e às metodologias de ensino, bem como incentivar programas permanentes de formação continuada.

Espera-se que os resultados desta pesquisa subsidiem ações das instituições formadoras e das Secretarias Municipais de Educação, contribuindo para a elaboração de estratégias que promovam o aperfeiçoamento da prática docente e a melhoria da qualidade do ensino da Matemática nos anos iniciais da Educação Básica.

Referências

BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Conselho Pleno. Resolução CNE/CP nº 2, de 20 de dezembro de 2019. Brasília, DF, 2019.

BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Conselho Pleno. Resolução CNE/CP nº 4, de 29 de maio de 2024. Brasília, DF, 2024.

CURI, Edda. A Matemática e os professores dos anos iniciais. São Paulo: Musa Editora, 2005.

D'AMBROSIO, Ubiratan. Educação matemática: da teoria à prática. Campinas: Papirus, 1996.

FREIRE, Paulo. Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

FREIRE, Paulo. Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa. 25. ed. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

GATTI, Bernadete A. Formação de Professores no Brasil. Fundação Carlos Chagas, 2010.

GATTI, Bernadete Angelina. Formação de professores no Brasil: características e problemas. Educação & Sociedade, Campinas, v. 31, n. 113, p. 1355-1379, 2010.

GOMES, Alexandra; PALMA, Rute Cristina Domingos da. Formação matemática de pedagogos: desafios para a docência nos anos iniciais. Roteiro, Joaçaba, v. 45, 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA (INEP). Censo da Educação Superior 2022. Brasília, DF: INEP, 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA (INEP). Resumo técnico: Censo Escolar da Educação Básica 2023. Brasília, DF: INEP, 2024.

LIBÂNEO, José Carlos. Pedagogia e pedagogos, para quê? 13. ed. São Paulo: Cortez, 2022.

LOURO, Guacira Lopes. Gênero, sexualidade e educação: uma perspectiva pós-estruturalista. Petrópolis, RJ: Vozes, 1998.

PIMENTA, Selma Garrido. Formação de professores: identidade e saberes da docência. In: PIMENTA, Selma Garrido (org.). Saberes pedagógicos e atividade docente. São Paulo: Cortez, 1996. p. 15-34.

SANTOS, Hosana da Silva Lobo; ALMEIDA, Marcelo Rubens Braga; LOURENÇO, Janes Carla Mota. Dificuldades no aprendizado de Matemática: culpa dos pedagogos?! Revista Faculdade Filos, Águas Lindas de Goiás, v. 1, p. 18-24, 2025.

STAUB, M.; PAVANELLO, R. M.; BEZERRA, F. M. Formação inicial de professores que ensinam Matemática: desafios e perspectivas. Acta Scientiarum. Education, v. 47, 2025.

TARDIF, Maurice. Saberes docentes e formação profissional. Petrópolis, RJ: Vozes, 2014.

WIKIMEDIA COMMONS. Mapa de localização do município de Vila Flor, Rio Grande do Norte. Disponível em: https://commons.wikimedia.org.

Anexos



FIGURA 1 - Representação geográfica do município de Vila Flor/RN. Fonte: Júnior, 2011



Tabela 1 - Dados socioeconômicos dos educadores da rede municipal de Vila Flor/RN. Fonte: Autores, 2026



Gráfico 1: Resultados da pesquisa em relação a avaliação da formação em Matemática. Fonte: (Autores, 2026) a partir dos dados coletados da pesquisa.



Gráfico 2: Expõe a relação de dificuldades dos pedagogos e professores na Matemática. Fonte: (Autores, 2026) a partir dos dados coletados da pesquisa.



Tabela 2 - Percepção dos educadores sobre os níveis de dificuldade dos principais eixos da Matemática. Fonte: Autores, 2026

CÓDIGO: HS0659

AUTOR: MARIA RITA DA SILVA NASCIMENTO

ORIENTADOR: GLEICE VIRGINIA MEDEIROS DE AZAMBUJA ELALI

TÍTULO: Ambiências restauradoras em áreas livres do Campus Central da UFRN sob o ponto de vista dos estudantes

Resumo

Justificado pela crescente importância das questões de saúde mental no contexto acadêmico, esta pesquisa investiga a percepção dos estudantes da UFRN sobre ambiências restauradoras em áreas livres do Campus Central, entendidas como locais/situações que auxiliam na busca por equilíbrio físico e psíquico. Após revisão bibliográfica, a metodologia envolveu elaboração de instrumento para abordagem dos estudantes, focalizando níveis de estresse, suas causas principais e os locais frequentados para alívio. Na continuidade foi realizado seu pré-teste, aplicado a 65 participantes vinculados ao Centro de Tecnologia. Os resultados indicam a demanda acadêmica como maior fonte de estresse (citada por 76,92% dos respondentes). Entre os locais restauradores destacam-se o Prédio de Laboratórios de Arquitetura (‘Galis’) e a Praça do Centro de Tecnologia (18 menções cada). O mapeamento e análise desses espaços oferece subsídios para a proposta de intervenções que promovam o bem-estar da comunidade universitária. Reforça-se a importância da continuidade do projeto.

Palavras-chave: Ambiências restauradoras. Estresse acadêmico. Estudantes universitário

TITLE: Restorative environments in the open spaces of the UFRN Central Campus from the students' perspective

Abstract

Motivated by the growing importance of mental health issues in the academic context, this research investigates UFRN students' perceptions of restorative environments in the open spaces of the Central Campus—defined as places or situations that aid in achieving physical and psychological balance. Following a literature review, the

methodology involved developing a survey instrument to assess students' stress levels, primary stressors, and the locations they frequent for stress relief. A pre-test was subsequently conducted with 65 participants affiliated with the Technology Center. The results identify academic demands as the primary source of stress (cited by 76.92% of respondents). Notable restorative locations include the Architecture Laboratories Building ("Galis") and the Technology Center Plaza (18 mentions each). Mapping and analyzing these spaces provides a basis for proposing interventions that promote the well-being of the university community, underscoring the importance of continuing the project.

Keywords: Restorative environments. Academic stress. University students. Enviro

Introdução

Diante das questões de saúde física e mental tornando-se cada vez mais centrais na vida cotidiana, a compreensão da percepção dos usuários em áreas urbanas é fundamental para entender as formas de apropriação local e orientar intervenções arquitetônicas e urbanísticas que favoreçam o bem-estar.

Inserindo-se nessa temática, porém focalizando-a no âmbito da vida universitária, o projeto “Ambiências restauradoras em campi da UFRN”, se propõe a compreender como a comunidade acadêmica (servidores e estudantes) percebe e utiliza as áreas livres do Campus Central da UFRN, a fim de identificar locais cujas características facilitam a restauração do equilíbrio dessas pessoas, contribuindo para políticas de bem-estar institucional. Nesse contexto, esta bolsa de iniciação científica voltou-se especificamente para os estudantes, entendidos como agentes essenciais do corpo universitário e espacialmente muito ativos, visto que são os principais usuários da estrutura da universidade (espaços de convivência, salas de aula, laboratórios, restaurantes, cantinas e outros).

A bolsa se iniciou na busca pela compreensão de conceitos básicos que cercam o tema de “Ambientes Restauradores” a fim de assimilar seus efeitos na rotina dos discentes, com reflexo tanto em sua vivência acadêmica, quanto em sua vida pessoal e condições mentais/psíquicas.

Durante as primeiras semanas a atividade teve como foco a leitura de materiais que pesquisassem o tema aplicado a alguma parcela da sociedade, tendo como principais bases teóricas os trabalhos relacionados a: (i) estresse ambiental (Cohen , et al, 1983; Gresser, Gunther, 2013; Lipp, 2006; Ribeiro et al, 2018); (ii) ambientes restauradores Alves, 201; García-Ros et al, 2012; Silveira, Felippe, 2019; Sousa et al, 2015; Subiza-Pérez et al., 2021; Ulrich, 1984; Uzell, Moser, 2006;.Zimpmel, 2005); e (iii) ambiências (Augoyard, 2011; Duarte, 2013; Elali, 2019 e 2020; Thibaud, 2018).

Após a formação de uma base para entendimento dos conceitos e situações de caso, a prática continuou através do estudo metodológico, tendo como objetivo a catalogação de instrumentos de pesquisa utilizados nesse campo, como as experiências de Kaplan

(1995), Souza et al (2014), Silveira et al (2019), Gomes Junior (2024). Destacou-se, ainda, um questionário sobre estresse e ambientes restauradores e seus atributos, aplicado a turmas do curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) em anos anteriores no contexto da disciplina Psicologia Ambiental, ministrada pela docente coordenadora deste projeto de pesquisa. Com base no entendimento inicial do conceito, do modo como ele se firmava para os estudantes e como esses discentes compreendiam sua relação com seus próprios ambientes visando a obtenção de restauro mental e físico, foi trabalhada a formulação do questionário pré-teste.

Metodologia

A trajetória desenvolvida no âmbito do projeto de pesquisa "Ambiências restauradoras em campi da UFRN", vinculado ao Grupo PROJETAR, estruturou-se em etapas consecutivas de fundamentação teórica, formulação de instrumentos, coleta, sistematização e análise piloto de dados. O processo metodológico realizado ao longo de um ano de pesquisa compreendeu:

1. Revisão bibliográfica e fundamentação conceitual: o período inicial foi dedicado ao desenvolvimento de competências para a identificação e a sistematização de material bibliográfico. Realizou-se uma leitura conceitual e bibliográfica focando na relação pessoa-ambiente, especificamente sobre as temáticas de ambientes restauradores e níveis de estresse. Foram discutidos conceitos centrais da Psicologia Ambiental e da percepção ambiental.

2. Leitura e catalogação de instrumentos de estudo: realizou-se a leitura e catalogação de instrumentos utilizados por diversos autores, inclusive um formulário direcionado especificamente a turmas do curso de Arquitetura e Urbanismo. Essa etapa permitiu entender previamente quais eram os efeitos do estresse acadêmico na vida dos estudantes, e quais eram seus "supressores" (ambientes restauradores) em uma escala macro, ao ver esses espaços além das dependências do campus da UFRN.

3. Elaboração da ferramenta de pesquisa: com base nas leituras anteriores, notadamente na tese de Gomes Júnior (2024) que se mostrou uma importante referência estrutural na fase de delineamento e definição das ferramentas metodológicas, tendo se mostrado essencial como subsídio para:

A escolha e a adaptação do questionário, focados no perfil sociodemográfico, na rotina diária e nas fontes de estresse dos participantes.

A incorporação e o entendimento da aplicação da Escala de Estresse Percebido (PSS) para quantificar o estresse no contexto brasileiro, embora o estudo realizado não tenha adotado tal instrumento.

A metodologia de identificação, indicação e posterior análise qualitativa dos locais considerados restauradores pelos estudantes.

4. Aplicação do pré-teste e sistematização dos dados: O principal instrumento elaborado foi um formulário que abordou as condições de estresse dos participantes no momento de sua abordagem, comparado aos últimos 60 dias, a fim de investigar estratégias utilizadas por eles/as para reduzi-lo. Foram ao todo 13 perguntas qualitativas, tais como: “O quanto você está estressado hoje? “; “Comparando com outros dias na UFRN, como você descreveria o dia de hoje? (em termos de estresse, considere os últimos 60 dias)”. Também foram solicitadas a indicação de três situações estressantes e três locais de refúgio no campus.

Nesse primeiro ano não foi possível aplicar o instrumento de modo extenso (ao universo de estudos pretendido), sendo realizado apenas seu pré-teste, que envolveu 65 estudantes, em sua maioria na faixa etária de 18 a 23 anos (70,7% dos respondentes). Para a análise dos dados, além de estatística descritiva simples, a compreensão das respostas às questões abertas envolveu uma metodologia de decodificação de conteúdo categorizada por tipos de estressores. Estes foram divididos em: Demanda acadêmica, Estágios/bolsas, Transporte/locomoção, Vida pessoal/demandas familiares e Outros. Paralelamente, realizou-se a sistematização da frequência de menções aos locais restauradores do campus, identificando a atratividade e o potencial restaurativo de pontos específicos a partir da percepção direta dos usuários

5. Análise de dados e preparação para expansão do estudo: Os dados tabulados foram submetidos a discussões com a orientadora, avaliando o desempenho do formulário piloto. Esse pré-teste foi um importante passo metodológico para refinar e validar o instrumento de pesquisa a ser utilizado na continuidade da investigação, estruturando o caminho para a futura expansão e aplicação do estudo a fim de abranger todo o Campus Central da UFRN, Natal/RN.

Resultados e Discussões

Os dados revelam que, para os participantes, a vida acadêmica é o fator de estresse predominante, representando 51,55% das respostas totais mencionadas e afetando 76,92% dos participantes (Gráfico 1). Entre as queixas específicas, destacam-se os prazos apertados, o acúmulo de trabalhos (individuais e em grupo), a pressão das provas e a relação hierárquica por vezes conturbada entre docentes e discentes. Outros fatores significativos incluem:

Transporte/Locomoção: Citado como estressor por 18,46% dos alunos, especialmente devido às fraquezas infraestruturais do transporte circular universitário e à superlotação. Destaca-se que quase metade dos estudantes (48,4%) utiliza transporte coletivo público (Gráfico 2), a maioria dos quais denuncia sua precariedade. Revela-se, assim, a conexão direta entre o aporte estrutural oferecido pela universidade e a relação dos discentes com a própria rotina, interferindo diretamente em sua qualidade de vida.

Vida Pessoal e Estágios: O desafio de conciliar a rotina de estudos com estágios, bolsas e morar sozinho foi recorrente.

Como Locais Restauradores no Campus (ou seja, aqueles que o alunado frequenta para aliviar o estresse) a pesquisa identificou espaços livres e construídos, com forte preferência por locais que oferecem conforto térmico, áreas verdes ou espaços de socialização (Gráfico 3 e Mapa 1). Os locais mais citados foram:

Departamento de Arquitetura e Urbanismo (Galinheiro – Figura 1): 18 menções. Alunos destacam o sofá, o átrio e as pracinhas próximas.

Praça do Centro de Tecnologia (CT): 18 menções. Valorizada como ponto de encontro e descanso.

Cantinas e "Tocas": 10 menções. Locais de alimentação rápida e pausa entre aulas.

Praça do Setor IV: 8 menções. Frequência associada à proximidade das áreas de aula.

Outros pontos mencionados incluem a Biblioteca Central (BCZM), a pista de atletismo, o "Renatão" (lanchonete nas dependências do campus) e áreas externas do Centro de Biociências (Figura 2). Notavelmente, alguns estudantes relataram não encontrar locais adequados no campus, mencionando a falta de infraestrutura para descanso e o excesso de barulho em certos setores (Gráfico 3)

Gráfico 1 -Situações que trazem mais estresse à rotina acadêmica dos alunos que responderam ao questionário.

Fonte:Ambiências restauradoras em áreas livres do Campus Central da UFRN sob o ponto de vista dos estudantes (2026)

Gráfico 2 -Forma de locomoção até a UFRN dos alunos que responderam ao questionário (64 respostas).

Fonte:Ambiências restauradoras em áreas livres do Campus Central da UFRN sob o ponto de vista dos estudantes (2026)

Gráfico 3. Ambientes restauradores dentro do campus segundo os participantes

Fonte:Ambiências restauradoras em áreas livres do Campus Central da UFRN sob o ponto de vista dos estudantes (2026)

Mapa 1. Mapa de localização dos ambientes restauradores mais mencionados pelos participantes

Fonte:Ambiências restauradoras em áreas livres do Campus Central da UFRN sob o ponto de vista dos estudantes (2026)

Figura 1 – Átrio do prédio de laboratórios do CAU/UFRN (Galinheiro)

Fonte:Ambiências restauradoras em áreas livres do Campus Central da UFRN sob o ponto de vista dos estudantes (2026)

Figura 2 - Centro de Biociências - UFRN

Fonte:Ambiências restauradoras em áreas livres do Campus Central da UFRN sob o ponto de vista dos estudantes (2026)

Os resultados revelam que a rotina universitária na UFRN impõe uma sobrecarga mental significativa aos estudantes. A "Demanda/situações da vida acadêmica" foi a fonte de estresse mais citada pelos respondentes, acumulando 51,55% das menções (50 ocorrências). Entre os principais fatores apontados estão o "acúmulo de trabalhos", "prazos apertados", "vésperas de entregas", "provas", e a "extensa grade de disciplinas".

Esta realidade empírica encontra perfeita explicação na distinção que Susana Alves (2011) faz sobre o funcionamento da atenção. Apoiada na Teoria da Restauração da Atenção (ART), Alves explica que as atividades especializadas modernas e os trabalhos acadêmicos exigem o uso contínuo da atenção dirigida (ou voluntária), processo cognitivo que requer a inibição ativa de distrações para manter o foco em uma tarefa. O esforço ininterrupto desse mecanismo inibitório satura os recursos mentais do indivíduo, resultando inevitavelmente na fadiga mental (Alves, 2011, p. 45). Como aponta Alves, os sinais clássicos desse esgotamento cognitivo são a irritabilidade, o comportamento antissocial e a diminuição da capacidade de concentração, que se alinham às queixas dos universitários sobre a "falta de tempo para a vida pessoal" e a perda de controle sobre as situações.

A relação entre a sobrecarga de estresse e a necessidade de espaços restauradores no ambiente universitário, sob a ótica da Psicologia Ambiental, revela como a arquitetura e o planejamento urbano do campus desempenham um papel vital na saúde mental e física dos estudantes. Tal entendimento tem como pressuposto uma visão do campus como organismo urbano, de modo que seu planejamento, projeto e manutenção constituem fatores essenciais para a permanência, o uso, e a apropriação de seus espaços. Garantir o aporte estrutural é fundamental, a partir da ótica da Teoria Psicoevolucionista (PET) de Ulrich-1984, a recuperação psicofisiológica do estresse é disparada por atributos ambientais específicos, incluindo a ordem (planejamento legível e organizado), a ausência de ameaças físicas e a presença abundante de vegetação e água. Diante disso, a arquitetura e o planejamento urbano são essenciais para a formação e manutenção desses espaços. Ao consultar a maioria dos ambientes em que os alunos buscam restauração mental e física (gráfico 3), é possível encontrar características comuns entre esses espaços. A presença de vegetação, conforto ambiental, mobiliário.

Para os estudantes, o contato com o verde — seja nos bosques, nos pequenos jardins ou na sutil área externa do Centro de Biociências — é a principal porta de entrada para a calma. Na arquitetura, a vegetação não deve ser tratada apenas como ornamento estético, mas como um elemento de saúde preventiva. Afastar-se fisicamente das salas de aula, em direção a espaços arborizados, permite um distanciamento mental imediato das fontes de estresse acadêmico, agindo como escape físico e mental, Kaplan (1995) . Bem como essa presença desses elementos naturais (movimento das folhas, som dos pássaros, observação da fauna) agem como elementos de fascinação contidos nesses ambientes, chamando a atenção do usuário e convidando ao uso do espaço.

Para que um ambiente ofereça a “Extensão”, ele precisa ser sentido como um "mundo à parte", onde a pessoa se sinta pertencente ao espaço, como uma “extensão” dele. Uma

praça bem sombreada, dando ao estudante a sensação de abrigo e proteção física necessária para que aconteça o processo emocional de restauração.

Atingir a compatibilidade com um ambiente pode ser facilitada se nele tiverem possibilidades claras de permanência, como a presença de mobiliário. Há uma harmonia quando as facilidades do ambiente se alinham perfeitamente com as necessidades imediatas do usuário Kaplan (1995).

No entanto, esse contexto, ficou claro que, tanto quanto ambientes que possibilitem a restauração psicológica, é preciso que neles as pessoas sintam a prevalência de ambiências (Augoyard, 2011; Duarte, 2013; Thibaud, 2018), caracterizadas pela oferta de condições para plena vivência de atividades, sensações e sentimentos que favoreçam essa restauração, tais como autonomia, experiências que facilitem a liberdade de expressão, o distanciamento das situações estressoras (mesmo que por pouco tempo) e o usufruto de atividades condizentes com as necessidades psicológicas de cada um/uma (Elali, 2019 e 2020).

Com base nessa compreensão, o planejamento dos espaços do campus deveria priorizar essa propriedade, de modo a possibilitar o uso de espaços individuais e reservados para o silêncio, a leitura individual e a contemplação, mas também dispor de espaços coletivos, que convidem ao encontro das pessoas. Nesse contexto, a presença de bancos (locais para sentar) favorece a permanência em conjunto, a maior socialização e a atenuação do estresse de forma coletiva.

Conclusão

.A articulação teórica e metodológica estabelecida a partir da tese de Gomes Júnior (2024) revelou-se um alicerce para compreender as complexas dinâmicas socioespaciais e comportamentais dos estudantes.

Os resultados alcançados pelo pré-teste com 65 participantes do Centro de Tecnologia consolidam três grandes eixos de reflexão:

A Indissociabilidade entre Ambiente e Comportamento ("Situações Restauradoras"): Os dados empíricos demonstraram que o potencial restaurativo de um local não reside exclusivamente em seus atributos biofísicos isolados, mas na relação de sinergia entre o espaço físico e a ação nele desenvolvida.

A Arquitetura como Promotora Ativa de Saúde Mental: A expressiva prevalência do estresse de origem acadêmica (afetando 76,92% dos discentes) reforça que o planejamento e o desenho urbano do campus não podem ser tratados de forma neutra. A preferência declarada por locais sombreados, ventilados e dotados de mobiliário de descanso confortável reitera o papel ético da arquitetura em produzir microclimas e cenários de suporte contra a exaustão cognitiva.

Perspectivas de Gênero e o Uso do Espaço: A literatura e os dados apontam que a percepção de estresse e a busca por estratégias de enfrentamento são marcadas por nítidas disparidades de gênero. A maior vulnerabilidade ao estresse relatada pelo público feminino e a eleição de espaços privados (como a própria residência) ou de atividades introspectivas (como dormir) sugerem que o espaço público do campus pode carregar nuances de insegurança ou desconforto para as estudantes.

Limitações e Recomendações para Estudos Futuros

Como limitação intrínseca a esta etapa inicial, destaca-se o recorte amostral focado, acidentalmente, em um único centro acadêmico (Centro de Tecnologia). Para a consolidação de diretrizes projetuais aplicáveis a nível institucional, recomenda-se:

Expansão Metodológica: Ampliar ainda mais a escala geral a todos os centros do Campus Central da UFRN em Natal/RN, garantindo a representatividade de diferentes áreas de conhecimento.

Inclusão de Outros Grupos: Expandir a investigação para estudantes de diferentes períodos acadêmicos e para a comunidade de servidores docentes e técnicos dispostos no campus, minimizando vieses geracionais.

Variáveis Climáticas: Incorporar formalmente no instrumento de coleta a influência de variáveis climáticas específicas (como as altas temperaturas locais e a radiação solar), analisando de que forma o sombreamento vegetal e artificial medeia a escolha e o uso dos refúgios ao ar livre.

Em suma, a investigação das ambiências restauradoras na UFRN oferece um subsídio científico indispensável para políticas públicas e institucionais de infraestrutura e bem-estar. Ao transformar praças, pátios e corredores em cenários intencionais de descanso e socialização, a universidade assume um papel ativo na mitigação do estresse acadêmico, reconfigurando o espaço construído como um legítimo agente de acolhimento e cuidado coletivo.

Referências

ALVES, Susana Martins. Ambientes restauradores. In: CAVALCANTE, Sylvia; ELALI, Gleice A. (Orgs.). Temas básicos em Psicologia Ambiental. Petrópolis: Vozes, pp. 44-52, 2011.

AUGOYARD, J. F. Faire une ambiance. Bernin: La Croisée, 2011.

COHEN, Sheldon; KAMARCK, Tom; MERMELSTEIN, Robin. A global measure of perceived stress. Journal of Health and Social Behavior, 24, 385-396, 1983. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/i310965. Acesso em: nov/2022.

DUARTE, C. R. Ambiance: pour une aprroche sensible d l'espace. In: THIBAUD, J.-P.; DUARTE, C. R. (Org.). Ambiences urbaines em partage. Genève: Metis Presses, 2013. p. 21-30.

ELALI, G. A. Ambiências criativas na cidade. In: DUARTE, C. R. S.; PINHEIRO, E. (Orgs). Arquitetura, Subjetividade e Cultura: Cenários de Pesquisa no Brasil e Pelo Mundo. Rio de Janeiro: Rio Books / PROARQ - FAU-UFRJ, 2020, pp. 284-319.

ELALI, G. A. Relações entre comportamento humano e ambiência: uma reflexão com base na psicologia ambiental. In: COLÓQUIO AMBIÊNCIAS COMPARTILHADAS. Anais do ..... Rio de Janeiro: ProArq - UFRJ, 2009.

GARCÍA-ROS, R.; PÉREZ-GONZÁLEZ, F.; PÉREZ-BLASCO, J.; NATIVIDAD, L. A. Evaluación del estrés académico en estudiantes de nueva incorporación a la universidad. Revista Latinoamericana de Psicología, v. 44, pp. 143-54, 2012.

GEHL, J. Cidades para pessoas. São Paulo: Perspectiva, 2015.

GOMES JUNIOR, J. Ambientes restauradores para adolescentes: uma investigação com estudantes de uma cidade de médio porte do Nordeste brasileiro. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Psicologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPgPsi/UFRN), 2024.

GRESSER, S. C.; GUNTHER, I. A. Ambientes restauradores: definição, histórico, abordagens e pesquisas. Estudos de Psicologia, v. 18, n. 3, p. 487-495, set. 2013.

GÜNTER, H. Affordance. In: CAVALCANTE, S.; ELALI, G. A. (orgs). Temas básicos em Psicologia Ambiental. Petrópolis: Vozes, 2011. cap. 1, p. 21-27.

GÜNTHER, H.; ELALI, G. A.; PINHEIRO, J. Q. A abordagem multimétodos em estudos pessoa-ambiente: características, definições e implicações. In: PINHEIRO, José Q.; GÜNTHER, Hartmut (Org.). Métodos de pesquisa nos estudos pessoa-ambiente. São Paulo: Casa do Psicólogo, pp. 369-396, 2008.

LIPP, M. E. N. Stress: conceitos básicos. In: LIPP, M. Pesquisas sobre stress no Brasil: saúde, ocupações e grupos de risco. Campinas: papyrus. 2006, p. 17-31.

RIBEIRO, I. J. S.; PEREIRA, R.; FREIRE I. V.; OLIVEIRA, B. G.; CASOTTI, C. A.; BOERY, E. N. Stress and quality of life among university students: a systematic literature review. Health Professional Education. v. 4, n. 2, 2018, pp. 70-7. Dsiponível em: http://doi. org/10.1016/j.hpe.2017.03.002

SARMENTO, B. R. A qualidade ambiental de espaços livres em campi: um estudo na UFPB e UFRN sob a ótica da avaliação pós-ocupação. 2017. 328f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SILVEIRA, B. B.; FELIPPE, M. L. Síntese e recomendações para Ambientes Restauradores. In. SILVEIRA, B. B.; FELIPPE, M. L. (Orgs.), Ambientes

Restauradores – Conceitos e Pesquisas em Contextos de Saúde. Florianópolis: EdUFSC, 2019, pp. 114-116.

SILVEIRA, B. B.; FELIPPE, M. L.; SCHÜTZ, N. T. Ambientes Restauradores: conceitos e definições. In. SILVEIRA, B. B.; FELIPPE, M. L. (Orgs.), Ambientes Restauradores – Conceitos e Pesquisas em Contextos de Saúde. (pp. 9-22). Florianópolis, UFSC, 2019.

SOUSA, A.; MEDEIROS, J.; ALBUQUERQUE, D.; HIGUCHI, M. I. Parque verde urbano como espaço de desenvolvimento psicossocial e sensibilização socioambiental. Psico, 46(3), 301-310, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.15448/1980-8623.2015.3.17423. Acesso em: jun/2021.

STAATS, S.; COSMAR, D.; KAFFENBERGER, J. Sources of happiness and stress for college students: a replication and comparison over 20 years. Psychological Reports. v. 101, n. 3 (Pt 1), 2007, pp. 685-96. http://doi.org/10.2466/pr0.101.3.685-696. PMid:18232421.

SUBIZA-PÉREZ, M.; PASANE, T.; RATCLIFFE, E.; LEE, K.; BORNIOLI, A.; BLOOM, J.; KORPELA, K. Exploring psychological restoration in favorite indoor and outdoor urban places using a top-down perspective. Journal of Environmental Psychology. 78, 1-10, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/ j.jenvp.2021.101706. Acesso em: ago/2022.

THIBAUD, J.-P. Ambiência. In: CAVALCANTE, S.; ELALI, G. A. (Orgs.). Psicologia ambiental: conceitos para a leitura da relação pessoa-ambiente. Petrópolis: Vozes, 2018, p. 13-25.

TWEDT, E.; RAINEY, R.; PROFFITT, D.. Beyond nature: the rolae of visual appeal and individual diferences in perceived restorative potential. Journal of Environmental Psychology, 65, 1-11, 2019. DOI 10.1016/j.jenvp.2019.101322. Acesso em: ago/2022.

ULRICHR. S. (1984) View through a Window may influence recovery from surgery

Science, New series, Volume 224, Issue 4667 (Apr. 1984), 420-421.

UZELL, D.; MOSER, G. On the quality life of environments. European Review of Applied Psychology, v. 20, n. 4, 2006, pp. 307-318.

ZIMPMEL, R. R. Aprendendo a lidar com o estresse. São Leopoldo: Sinodai, 2005

Anexos



Figuras e Gráficos 1



Figuras e Gráficos 2



Figuras e Gráficos 3

CÓDIGO: HS0688

AUTOR: VICTOR GABRIEL MILITAO DA SILVA

ORIENTADOR: MAISA FERNANDES DUTRA VELOSO

TÍTULO: Levantamento e análise dos periódicos on-line da área de Arquitetura e Urbanismo

Resumo

A produção científica em Arquitetura e Urbanismo (AU) constitui um campo marcado pela diversidade de temas, abordagens e interfaces com outras áreas do conhecimento. Este relatório descreve as atividades desenvolvidas no âmbito da pesquisa que objetiva mapear e caracterizar os periódicos científicos vinculados à área, considerando os estratos A1 a B1 da classificação do Qualis da CAPES, nos quadriênios 2017-2020 e 2021-2024. Este primeiro ano de investigação concentrou-se no levantamento, classificação e sistematização dos periódicos, a partir de consultas à Plataforma Sucupira e às páginas oficiais das revistas. Foram analisados individualmente 1.624 periódicos no primeiro quadriênio e 1.889 no segundo, resultando, após a consolidação dos dados, em uma base com 1.854 periódicos, distribuídos entre Arquitetura e Urbanismo, Design, periódicos interdisciplinares e “outros”. Os resultados evidenciam a amplitude dos espaços de circulação da produção científica em AU, incluindo periódicos vinculados a outras áreas-mãe que também publicam trabalhos relacionados ao campo. O levantamento também revelou desafios na delimitação da área e na sistematização das informações, especialmente pela necessidade de verificação manual dos periódicos da área-mãe na plataforma Sucupira e pela ocorrência de duplicações entre versões impressas e digitais. A base construída subsidiará a seleção dos periódicos mais representativos e de uma amostra de artigos para análise nas etapas seguintes.

Palavras-chave: Produção acadêmica; Periódicos científicos; Interdisciplinaridade.

TITLE: Survey and Analysis of Online Journals in the Field of Architecture and Urbanism

Abstract

Scientific production in Architecture and Urbanism (AU) is characterized by diverse themes, approaches, and interfaces with other fields. This report presents activities developed within a research project aimed at mapping and characterizing scientific journals in the field, considering those classified in the A1 to B1 strata of the CAPES Qualis classification for the 2017–2020 and 2021–2024 four-year periods. During the

first year, activities focused on surveying, classifying, and systematizing journals through consultations of the Sucupira Platform and official journal websites. A total of 1,624 journals were individually analyzed for the first period and 1,889 for the second, resulting, after consolidation, in a database of 1,854 journals classified as Architecture and Urbanism, Design, interdisciplinary, and "other". The results demonstrate the breadth of venues through which AU research is disseminated, including journals associated with other disciplinary areas that publish research related to the field. The survey also revealed challenges in defining the field and systematizing information, particularly due to the manual verification of journals' primary disciplinary areas and duplicate records of print and digital versions. The database will support the selection of representative journals and articles for analysis in subsequent stages.

Keywords: Academic research; Scientific journals; Interdisciplinarity.

Introdução

A pesquisa "A produção científica recente na área de Arquitetura e Urbanismo no Brasil: uma leitura dos artigos publicados em periódicos" (código: PVG23705-2025), à qual esse plano de trabalho está vinculado, insere-se no debate sobre a produção, circulação e avaliação do conhecimento científico no campo da Arquitetura e do Urbanismo (AU). A investigação considera as transformações ocorridas na pesquisa e na pós-graduação brasileira e a crescente importância dos periódicos científicos como meios de divulgação da produção acadêmica, especialmente diante da expansão das publicações digitais e das revistas vinculadas à área (Veloso, 2025).

Embora livros, capítulos de livros e anais de congressos e demais eventos ainda apresentem participação significativa na produção bibliográfica de AU, a publicação em periódicos vem ganhando espaço, acompanhando a ampliação da pesquisa e da pós-graduação no campo. Nesse contexto, os processos de avaliação da produção científica também assumem relevância. Conforme apresentado no projeto de pesquisa, a avaliação dos periódicos de Arquitetura e Urbanismo no quadriênio anterior considerou, entre outros aspectos, indicadores bibliométricos como o índice H5 do Google Scholar (CAPES/DAV, 2021 apud Veloso, 2025). Mais recentemente, novas orientações da CAPES passaram a discutir procedimentos voltados à avaliação dos próprios artigos, incluindo aspectos qualitativos como pertinência temática e avanço conceitual ou metodológico (CAPES/DAV, 2024 apud Veloso, 2025).

Diante desse cenário, a pesquisa busca compreender não apenas os veículos responsáveis pela divulgação da produção científica, mas também as características dos artigos publicados nesses periódicos. O objetivo geral da pesquisa consiste em mapear, caracterizar e analisar a produção científica recente em Arquitetura e Urbanismo no Brasil, considerando aspectos temáticos, teóricos e metodológicos dos trabalhos publicados em periódicos de referência da área (Veloso, 2025).

Para isso, no primeiro ano da investigação, as atividades concentraram-se na delimitação e organização do universo de periódicos que subsidiará as etapas posteriores da pesquisa. Foram levantados os periódicos vinculados à "área-mãe" de Arquitetura e Urbanismo nos quadriênios 2017-2020 e 2021-2024, tendo como fontes de consulta as informações disponíveis na Plataforma Sucupira e nos sites dos próprios

periódicos. O levantamento contemplou a identificação e a caracterização dos periódicos pertinentes ao recorte estabelecido, considerando aqueles classificados entre os estratos A1 e B1, bem como a verificação de sua vinculação à área-mãe.

Após a consolidação do primeiro levantamento, os mesmos procedimentos de consulta, análise e classificação foram aplicados ao quadriênio 2021-2024, buscando preservar critérios equivalentes entre os dois períodos e possibilitar a construção de uma base de dados comparável. Nessa segunda etapa, também foi realizada a verificação individual de cada periódico da área-mãe na Plataforma Sucupira, contribuindo para a conferência e o refinamento das informações coletadas.

Assim, os resultados alcançados no primeiro ano correspondem principalmente à construção, conferência e sistematização da base de periódicos que compõem o universo empírico da pesquisa. Essa etapa serviu de fundamento para as fases seguintes, voltadas à seleção e análise dos artigos publicados, permitindo avançar na compreensão das características e tendências da produção científica recente em Arquitetura e Urbanismo. A participação na pesquisa também proporcionou experiência com procedimentos de levantamento, organização e sistematização de dados científicos, contribuindo para a formação acadêmica e para a aproximação com os processos de produção e avaliação do conhecimento na área.

Metodologia

A metodologia utilizada para o desenvolvimento das atividades referentes ao plano de trabalho que embasa este relatório envolve documentação e sistematização de dados disponíveis on-line, centrada no levantamento e na caracterização de periódicos científicos vinculados ao campo da Arquitetura e Urbanismo (AU). O procedimento partiu de uma abordagem predominantemente quantitativa, voltada à constituição de uma base de dados, seguida de procedimentos de análise, conferência e classificação das informações coletadas. O universo da pesquisa correspondeu aos periódicos classificados entre os estratos A1 e B1, os mais representativos da produção neste campo, nos quadriênios 2017-2020 e 2021-2024, considerando a classificação da área de avaliação de Arquitetura, Urbanismo e Design.

Os procedimentos metodológicos foram estruturados em dois momentos principais. O primeiro correspondeu ao levantamento dos periódicos classificados no quadriênio 2017-2020. A partir das informações disponíveis na Plataforma Sucupira, foram identificados os periódicos situados entre os estratos A1 e B1. Como a classificação da área de avaliação reúne periódicos vinculados a diferentes campos de conhecimento, foi necessária uma etapa complementar para identificar aqueles efetivamente relacionados à área-mãe de Arquitetura e Urbanismo, a partir dos critérios estabelecidos pela pesquisa e da análise realizada pela equipe, formada pela coordenadora e duas doutorandas colaboradoras.

Para essa identificação, cada periódico foi consultado individualmente em sua página oficial, considerando informações como apresentação, descrição, escopo editorial, áreas temáticas e demais elementos disponibilizados pelos próprios periódicos. Nos casos em

que essas informações não eram suficientes para definir sua relação com o campo da pesquisa, foram realizados procedimentos complementares, incluindo buscas pelas palavras-chave “arquitetura” e “urbanismo” nas páginas das revistas e a consulta aos títulos dos artigos publicados. Esse processo permitiu analisar o grau de aproximação de cada periódico com o campo da Arquitetura e Urbanismo e subsidiar sua classificação na base de dados.

A partir das informações levantadas, os periódicos foram distribuídos em cinco categorias: “outros”, para aqueles que não apresentavam relação suficiente com o recorte da pesquisa; “dúvidas”, para os casos cuja classificação não pôde ser definida de imediato e que deveriam ser posteriormente discutidos pela equipe; “Arquitetura e Urbanismo”, para os periódicos diretamente relacionados ao campo; “interdisciplinar com A/U/P incluídos”, para periódicos de caráter interdisciplinar que contemplavam Arquitetura, Urbanismo e/ou Paisagismo em seu escopo; e “Design”, considerando sua inserção na classificação da CAPES vinculada à área-mãe de Arquitetura e Urbanismo. As informações coletadas foram organizadas em uma planilha digital on-line, utilizada para sistematizar os dados e acompanhar o levantamento. Foram registrados, entre outros elementos, o nome do periódico, sua classificação, a descrição do periódico elaborada a partir das informações disponíveis em sua página oficial, o link de acesso e a categoria atribuída no processo de análise.

O segundo momento metodológico teve início após a divulgação da avaliação do relatório referente ao quadriênio 2021-2024. Para possibilitar a comparação entre os dois períodos, os dados referentes aos quadriênios 2017-2020 e 2021-2024 foram reunidos manualmente em uma única planilha. Inicialmente, foram identificados os periódicos presentes nos dois levantamentos e aqueles que apareciam somente em um dos períodos. Para os periódicos presentes em ambos, foi registrada a relação entre suas classificações, permitindo observar a manutenção ou alteração dos estratos.

Para sistematizar essa comparação, foram estabelecidas cinco categorias, observando o nosso recorte A1-B1: “manteve”, para os periódicos presentes nos dois levantamentos e classificados no mesmo estrato; “manteve, mas caiu de estrato”, para aqueles que permaneceram no levantamento dos dois quadriênios, mas apresentaram redução na classificação; “manteve, mas subiu de estrato”, para os que apresentaram elevação na classificação; “não apareceu no primeiro quadriênio analisado, mas entrou no segundo”, para periódicos que não atendiam ao recorte no primeiro levantamento, mas passaram a integrá-lo no segundo; e “não apareceu no segundo, mas manteve”, para aqueles presentes no primeiro levantamento que deixaram de aparecer no segundo, mas permaneceram registrados na base para fins comparativos.

Após a consolidação dos dois levantamentos, os periódicos incorporados à base referente ao quadriênio 2021-2024 foram submetidos aos mesmos procedimentos de consulta, análise e classificação empregados no primeiro momento, no caso dos periódicos que não apareceram anteriormente. Essa etapa buscou assegurar a aplicação de critérios equivalentes entre os dois períodos e, consequentemente, a construção de uma base de dados comparável. Como procedimento complementar, foi realizada a verificação individual da área-mãe de cada periódico na Plataforma Sucupira, considerando sua classificação específica. A consulta foi feita manualmente, periódico por periódico, uma vez que a plataforma não disponibiliza essas informações de forma

sistematizada em uma base passível de extração direta por área-mãe. Os dados obtidos foram conferidos e incorporados à planilha construída ao longo da pesquisa.

Desse modo, os procedimentos adotados permitiram constituir, organizar e conferir uma base de dados sistematizada sobre os periódicos selecionados nos dois quadriênios, permitindo a comparação de seu desempenho e estabelecendo as condições necessárias para as etapas posteriores da pesquisa.

Resultados e Discussões

Os resultados apresentados neste primeiro ano ainda possuem caráter inicial, uma vez que as etapas de levantamento e classificação dos periódicos demandaram um trabalho extenso de busca, consulta e conferência individual das informações. O esforço metodológico concentrou-se, sobretudo, na construção de uma base confiável e comparável, etapa fundamental para o desenvolvimento das análises posteriores da pesquisa.

No levantamento referente ao quadriênio 2017-2020, foram analisados individualmente 1.624 periódicos classificados pela área de Arquitetura, Urbanismo e Design (AUD), antes da consolidação da base. Para o quadriênio 2021-2024, o mesmo procedimento foi realizado para 1.889 periódicos. Após a análise e a posterior consolidação dos dados, a base resultante da junção dos dois quadriênios reuniu 1.854 periódicos, distribuídos em quatro categorias principais: 139 periódicos classificados como da área-mãede Arquitetura e Urbanismo, 37 como da área de Design, 171 como interdisciplinares e 1.507 como “outros”, periódicos de outras áreas em que pesquisadores de AUD publicaram. Esses números evidenciam a dimensão do universo inicialmente levantado e o volume de trabalho necessário para sua classificação.

A categoria “outros” merece destaque na interpretação dos resultados. Embora represente a maior parcela da base, ela não deve ser compreendida simplesmente como um conjunto de periódicos sem relação com a AU. Nessa categoria, encontram-se periódicos interdisciplinares ou vinculados a outras áreas-mãe, por exemplo, medicina e ciências da saúde, que, apesar de não se enquadrarem diretamente no recorte estabelecido, apresentam artigos e discussões relacionados à Arquitetura e ao Urbanismo. Esse resultado evidencia a presença da produção de AU em diferentes campos de conhecimento e aponta para a capacidade da área de estabelecer diálogos com outras disciplinas e de participar de debates que ultrapassam seus limites tradicionais.

Essa característica também pode ser compreendida como um indicativo da própria natureza interdisciplinar dos problemas enfrentados pela Arquitetura e pelo Urbanismo. Questões relacionadas à construção do espaço, às cidades, ao território, ao ambiente e às condições de vida são frequentemente compartilhadas com campos como Engenharia, Geografia, Ciências Sociais, entre outros. A presença de trabalhos de AU em periódicos classificados em outras áreas, portanto, revela possibilidades de interlocução da produção científica e amplia a compreensão sobre os espaços nos quais esse conhecimento circula.

Outro aspecto relevante identificado durante o levantamento foi a existência de duplicações entre versões impressas e eletrônicas de determinados periódicos. Como a pesquisa adotou como procedimento a consulta aos periódicos em suas páginas on-line, optou-se, nesses casos, pela exclusão das versões impressas duplicadas, evitando que um mesmo periódico fosse contabilizado mais de uma vez na base. Esse procedimento foi importante para garantir maior consistência aos quantitativos e evitar distorções na comparação entre os períodos.

A classificação inicial também revelou algumas dificuldades metodológicas importantes. Em um primeiro momento, a identificação dos periódicos relacionados à Arquitetura e Urbanismo foi realizada a partir da leitura de seus escopos, descrições, conteúdos e da análise da equipe de pesquisa. Nesse processo, observou-se que diversos periódicos relacionados à Construção Civil apresentavam significativa aproximação temática com a Arquitetura e Urbanismo e, por esse motivo, foram inicialmente classificados como pertencentes ao campo de AU. Entretanto, com a posterior inclusão da informação referente à área-mãe individual de cada periódico, buscando essas informações na Plataforma Sucupira, foi possível rever algumas dessas classificações e realocar os periódicos de acordo com sua vinculação registrada na Plataforma Sucupira.

Essa situação evidencia uma diferença importante entre a classificação construída a partir da leitura direta e interpretação dos conteúdos dos periódicos e a classificação institucional estabelecida pela CAPES. O primeiro procedimento permite reconhecer aproximações temáticas e interdisciplinares que não necessariamente coincidem com a área-mãe formalmente atribuída ao periódico. Já a consulta à Plataforma Sucupira possibilita identificar sua vinculação institucional e estabelecer um critério adicional para a organização da base. A utilização conjunta dessas informações contribuiu, portanto, para qualificar o levantamento e reduzir possíveis inconsistências.

A verificação da área-mãe constituiu, inclusive, uma das etapas mais trabalhosas do segundo momento da pesquisa. Embora a informação estivesse disponível na Plataforma Sucupira, ela não se encontrava organizada na planilha utilizada para o levantamento, exigindo uma consulta manual e individual de cada periódico. Assim, a incorporação desse dado à base demandou a abertura e conferência dos registros um a um, seguida da inserção manual das informações na planilha. Apesar de aumentar o tempo necessário para a realização do levantamento, esse procedimento possibilitou acrescentar uma variável importante à base e aprimorar a comparação entre os periódicos.

De modo geral, os resultados alcançados até o momento permitem identificar três aspectos principais. O primeiro refere-se à amplitude e à diversidade dos espaços de circulação da produção científica em Arquitetura e Urbanismo, evidenciada pela presença de trabalhos relacionados à área em periódicos classificados em diferentes campos de conhecimento. O segundo diz respeito à complexidade de delimitação da própria área, especialmente diante das interfaces com campos como Design, Construção Civil e outras áreas interdisciplinares. O terceiro está relacionado à importância da conferência e sistematização manual dos dados, uma vez que as informações disponibilizadas nas bases institucionais não contemplam todas as variáveis necessárias aos objetivos da pesquisa.

Nesse sentido, os resultados deste primeiro ano não se restringem aos quantitativos obtidos. A construção da base de dados constitui, em si, um resultado relevante da investigação, pois estabelece um universo organizado e comparável de periódicos para as próximas etapas. A partir dessa base, será possível avançar da caracterização dos veículos de publicação para a análise dos artigos neles publicados, permitindo investigar com maior profundidade os temas, abordagens e tendências da produção científica recente em Arquitetura e Urbanismo.

Conclusão

O desenvolvimento do primeiro ano da pesquisa permitiu cumprir uma etapa fundamental para a continuidade da investigação: a delimitação, o levantamento, a classificação e a sistematização do universo de periódicos a ser analisado nas etapas posteriores. Embora os resultados ainda sejam iniciais em relação ao objetivo geral da pesquisa, o volume de periódicos consultados e a necessidade de conferência individual das informações evidenciam a complexidade desse primeiro momento.

A construção da base de dados reuniu informações referentes a 1.854 periódicos, distribuídos entre Arquitetura e Urbanismo, Design, periódicos interdisciplinares e “outros”, a partir dos levantamentos dos quadriênios 2017-2020 e 2021-2024. Evidenciou-se a diversidade de espaços nos quais conhecimentos relacionados à AU são publicados. A presença de trabalhos da área em periódicos vinculados a outras áreas-mãe reforça o caráter interdisciplinar da produção científica e demonstra que questões relacionadas ao espaço, à cidade, ao território e ao ambiente ultrapassam os limites disciplinares tradicionalmente estabelecidos para a AU.

Outro resultado relevante foi a constatação de que a delimitação da área de Arquitetura e Urbanismo não coincide necessariamente com a classificação formal dos periódicos. A análise de seus escopos e conteúdos permitiu identificar aproximações temáticas que posteriormente foram confrontadas com a área-mãe registrada na Plataforma Sucupira. Esse procedimento possibilitou revisar classificações inicialmente atribuídas pela equipe, especialmente em periódicos relacionados à Construção Civil, o que contribuiu para maior precisão na composição da base. A consulta individual aos periódicos e a verificação manual de sua área-mãe demonstraram tanto a necessidade de conferência das informações disponíveis quanto às limitações de sua sistematização nas bases institucionais. A comparação entre os dois quadriênios também estabeleceu condições para acompanhar alterações na classificação dos periódicos e subsidiar as análises posteriores.

Considera-se, assim, que os objetivos previstos para esta etapa foram alcançados, especialmente quanto à constituição de uma base de dados sistematizada e comparável. Ainda não é possível estabelecer conclusões sobre as tendências temáticas, teóricas e metodológicas da produção científica em Arquitetura e Urbanismo, pois a análise dos artigos corresponde às etapas seguintes da pesquisa. Entretanto, a base construída oferece o suporte necessário para esse aprofundamento, permitindo avançar da caracterização dos veículos de publicação para a análise da produção científica efetivamente divulgada.

Referências

VELOSO, Maísa Fernandes Dutra. A produção científica recente na área Arquitetura e Urbanismo no Brasil: uma leitura dos artigos publicados em periódicos. Projeto de pesquisa (Iniciação Científica), código PVG23705-2025. Plano de trabalho: Levantamento e análise dos periódicos on-line da área de Arquitetura e Urbanismo. Edital nº 02/2025 – Iniciação Científica. Cota 2025-2026 (PIBIC), 01 set. 2025 – 31 ago. 2026. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.

REFERÊNCIAS DO PROJETO DE PESQUISA:

BAKER, G. H. Design Strategies in Architecture – an approach to the analysis of form. New York: Van Nostrand, 1996.

BARDIN, L. Análise de Conteúdo. Lisboa, Edições 70, 1977.

CALDANA, V. Pesquisa em Projeto de Arquitetura e urbanismo: caminhos, In: Cadernos de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, UPM, 2012.1, 148-164. Disponível em http://www.mackenzie.br/dhtm/seer/index.php/cpgau

CAPES/DAV. Relatório da Avaliação Quadrienal 2021. Brasília, 2021.

CAPES/DAV. Ofício Circular nº 46/2024-DAV/CAPES, de 03 de outubro de 2024. Brasília, 2024.

CHENG, N. Approaches to Design Collaboration Research. In: Automation in Construction Journal. Disponível em http://darkwing.uoregon.edu/~design/nywc/HTML/research.htm.

GROAT, L.; WANG. D. Architectural Research Methods. New York: Wiley, 2013.

KOSKINEN, I.; ZIMMERMAN, J.; BINDER, T.; REDSTRÖM, J.; WENSVEEN, S. Design Research Through Practice: From the Lab, Field and Showroom. Waltham, MA, USA: Elsevier/ Morgan Kaufmann, 2011.

KOWALTOWSKI, D.; MOREIRA, D. As pesquisas sobre processos de projeto em arquitetura: argumentos para uma reflexão. Revista PROJETAR – Projeto e Percepção do Ambiente, v.1.n.1, p.42-52, novembro, 2015.

KVAN, T. Agent support for monitoring collaborative design knowledge. In: International Conference Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, eCAADe: Anais, Graz, 2003.

LAWSON, Bryan. Design Reseacrch in Architecture: An Overview. Design Studies. v.36.n.1.p.125-130, janeiro, 2015.

LUCK, R. Design research, architectural research, architectural design research: An argument on disciplinarity and identity, Design Studies, Volume 65, 2019, Pages 152-166, ISSN 0142-694X, https://doi.org/10.1016/j.destud.2019.11.001.

MINAYO, Maria Cecília de Souza (org.). Pesquisa Social. Teoria, método e criatividade. 18 ed. Petrópolis: Vozes, 2001.

RAMOS, T. (coord.). Arquitetura, Urbanismo, Design: Metodologias e Métodos de Investigação. Lisboa: Caleidoscópio, 2011.

RENDELL, J. Architectural research and disciplinarity. Architectural Research Quarterly. 2004;8(2):141-147. doi:10.1017/S135913550400017X

SANTOS Jr., W. R.; MERINO, E.A.D.; ELALI, G. V. M. A. Relatório do Qualis Periódicos - Área de Arquitetura, Urbanismo e Design (Área 29). Brasília: CAPES, 2019.

SANTOS Jr., W. R.; SOBRAL, J. E. C.; ELALI, G. V. M. A. Avaliação Quadrienal 2017-2021 - Relatório de Avaliação - Área de Arquitetura, Urbanismo e Design (Área 29). Brasília: CAPES, 2022.

SYKES, C. Constructing a New Agenda for Architecture: Architectural Theory 1993-2009. Nova York, Princeton Architectural Press, 2011

VELOSO, M.; MARQUES, S. A pesquisa como elo entre teoria e prática do projeto: alguns caminhos possíveis. Arquitextos, São Paulo, ano 8, n. 088.8, Vitruvius, set. 2007 <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/08.088/211>.

VELOSO, M. A pesquisa na área de Projeto de Arquitetura e Urbanismo no Brasil (2003-2015). CNPq. Bolsa de Produtividade em Pesquisa, 2016-2019, Processo 309063/2015-9.

VELOSO, M.; SILVA, A.B.L.; LOBAO, R.S. A pesquisa na área de projeto de Arquitetura e Urbanismo no Brasil (2003-2015). In: VIII PROJETAR 2017, 2017, Buenos Aires. Anais do VIII PROJETAR 2017. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2017.

VELOSO, M. A pesquisa no campo de projeto de arquitetura e urbanismo no Brasil na perspectiva dos Seminários PROJETAR 2003-2013. Revista Projetar - Projeto e Percepção do Ambiente, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 53–58, 2019. DOI: 10.21680/2448-296X.2016v1n1ID18496. Disponível em: https://periodicos.ufrn.br/revprojetar/article/view/18496.

CÓDIGO: HS0883

AUTOR: ANA LUIZA MAFRA COSTA

COAUTOR: CLARA OVÍDIO DE MEDEIROS RODRIGUES

ORIENTADOR: HEITOR DE ANDRADE SILVA

TÍTULO: Análise e avaliação de projetos arquitetônicos de interesse social na ótica da resiliência: estudos de caso

Resumo

Este estudo investiga o potencial da inteligência artificial (IA) para apoiar a identificação e a representação gráfica de soluções de sombreamento em projetos premiados de Habitação de Interesse Social (HIS) no Brasil e em Portugal. O recorte integra uma pesquisa ampla sobre soluções arquitetônicas promotoras de resiliência em HIS, desenvolvida a partir da análise de 120 projetos premiados em 38 concursos públicos (2013-2023). Na primeira fase da pesquisa, os projetos foram avaliados por uma matriz multicritério qualitativa, com 2 macrocategorias, 8 mesocategorias e 32 microcategorias. Na segunda fase, testou-se em um recorte de 5 projetos o desempenho das versões gratuitas do ChatGPT, NotebookLM e Gemini na identificação de soluções e produção de representações gráficas simplificadas. Na terceira fase, expandiu-se o uso do NotebookLM e do ChatGPT para identificar e representar a variedade de soluções presentes na amostra de 120 projetos. Diante da relevância do conforto ambiental nas HIS e dos avanços da IA na leitura de imagens, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho dessas ferramentas para auxiliar na catalogação gráfica. Os resultados indicam as potencialidades e limites das ferramentas gratuitas na automação da análise projetual e na precisão do reconhecimento de elementos arquitetônicos.

Palavras-chave: Resiliência; Habitação de Interesse Social; Inteligência Artificial.

TITLE: Analysis and evaluation of social housing architectural projects from a resilience perspective: case studies

Abstract

This study investigates the potential of artificial intelligence (AI) to support the identification and graphic representation of shading solutions in award-winning Social Interest Housing (SIH) projects in Brazil and Portugal. This specific study is part of broader research on architectural solutions that foster resilience in SIH, based on the analysis of 120 projects awarded prizes in 38 public competitions (2013–2023). In the

first phase of the research, the projects were evaluated using a qualitative multi-criteria matrix comprising 2 macro-categories, 8 meso-categories, and 32 micro-categories. In the second phase, the performance of the free versions of ChatGPT, NotebookLM, and Gemini was tested on a subset of five projects regarding their ability to identify solutions and produce simplified graphic representations. In the third phase, the use of NotebookLM and ChatGPT was expanded to identify and represent the variety of solutions found across the full sample of 120 projects. Given the importance of environmental comfort in SIH and advancements in AI image analysis, this study aims to evaluate the performance of these tools in assisting with graphic cataloging. The results highlight the potential and limitations of these free tools regarding the automation of design analysis and the accuracy of architectural element recognition.

Keywords: Resilience; Social Housing; Artificial Intelligence.

Introdução

A resiliência na arquitetura é entendida pela capacidade da edificação adaptar-se e transformar-se em resposta aos diversos impactos ocasionados no decorrer do tempo (Garcia; Vale, 2017). Diante do cenário de mudanças climáticas e urbanização acelerada, o conceito de resiliência ocupa lugar central no debate para as agendas globais contemporâneas. A Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) estabelece diretrizes para mitigar vulnerabilidades socioambientais. Este trabalho alinha-se diretamente a dois Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): o ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis, e o ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima.

No contexto da Habitação de Interesse Social (HIS) no Brasil e em Portugal, promover o conforto térmico por meio de estratégias passivas, como o sombreamento arquitetônico, é um imperativo ético e técnico para garantir a habitabilidade e a saúde de populações vulneráveis aos extremos de temperatura. Dessa forma, mapear e catalogar estratégias passivas em acervos projetuais, como os projetos premiados em concursos públicos de arquitetura, constitui uma rica fonte de repertório para a prática profissional e acadêmica.

Contudo, a análise não automatizada dos documentos de cada projeto, quando aplicada a grandes volumes de dados, constitui um processo árduo e demorado. Esta investigação insere-se nesse hiato, integrando uma pesquisa ampla que contém um universo de 120 projetos, compostos pelos três primeiros colocados em 38 concursos públicos no Brasil e em Portugal entre 2013 e 2023. O foco reside na investigação do potencial de otimizar por meio da Inteligência Artificial a identificação e a catalogação gráfica da microcategoria “Presença de elementos para sombreamento”, essencial para a eficiência energética e adaptação climática das edificações.

Segundo Bazzan et al. (2023), a Inteligência Artificial (IA) é capaz de ler, interpretar e extrair dados de arquivos digitais complexos. Nos últimos anos, os avanços impulsionados pelo aprendizado profundo ampliaram o uso dessas tecnologias em processos de representação gráfica, oferecendo expressivos ganhos de otimização em relação ao redesenho e análise puramente manuais. Conforme González (2024), a IA

também possibilita automatizar o ajuste de traços, formas e cores, reduzindo o tempo de diagramação e viabilizando a reprodução de representações com consistência visual . A partir dessas contribuições, considera-se que a capacidade de aprendizagem desses sistemas permite processar grandes volumes de dados projetuais, estabelecer correlações formais e apoiar a síntese de soluções arquitetônicas.

Apesar do potencial otimizador, a aplicação da IA na leitura de pranchas arquitetônicas enfrenta severos limites epistemológicos e operacionais. Ao trabalhar com imagens, os algoritmos operam de forma estatística e não atribuem significados semióticos, funcionais ou estéticos da mesma maneira que os humanos. A IA converte desenhos técnicos em matrizes de pontos e blocos, identificando padrões por meio de filtros cujas "lentes" de treinamento frequentemente reproduzem assimetrias reais de poder e conhecimento (Beiguelman, 2024). Outro desafio é a geração de informações falsas, conhecidas como “alucinações”, e a omissão de dados críticos presentes nos desenhos (Bazzan et al., 2023).

Diante desse panorama, a supervisão e a curadoria humana tornam-se indispensáveis para validar as leituras, mitigar erros e contornar preconceitos geopolíticos das ferramentas. Assim, foi realizado inicialmente um trabalho piloto que avaliou o desempenho comparativo das versões gratuitas de três ferramentas de IA na leitura de pranchas, identificação de elementos de sombreamento e geração de representações gráficas em uma amostra pequena. Este artigo tem como objetivo analisar a escalabilidade do NotebookLM e ChatGPT para a catalogação gráfica dos 120 projetos da matriz base.

Metodologia

O recorte incidiu sobre a microcategoria “Presença de elementos para sombreamento”, integrante de uma matriz multicritério voltada à análise de soluções arquitetônicas promotoras de resiliência (Silva et al., 2025). O trabalho foi organizado em duas fases: um estudo exploratório de caráter comparativo com um recorte de 5 projetos; a adequação e escalabilidade da metodologia empregada no piloto para aplicação em 120 projetos.

2.1 Estudo Piloto

Para o estudo piloto de identificação e catalogação gráfica assistida por Inteligência Artificial de soluções de sombreamento em projetos de habitação de interesse social, foram selecionados cinco projetos com maior pontuação da microcategoria “Presença de elementos para sombreamento”. A seleção aconteceu por meio da aplicação de filtros considerando: a obtenção da pontuação máxima na microcategoria, o melhor desempenho na mesocategoria correspondente, o melhor desempenho na macrocategoria correspondente e, por fim, o maior nível de detalhamento e diversidade das soluções apresentadas. Os cinco melhores resultados nessa microcategoria foram de projetos portugueses entre 2020 e 2022.

Procedeu-se à análise e à representação não automatizadas das soluções de sombreamento de salas e quartos, considerados ambientes de maior permanência na habitação. Essas soluções foram organizadas em uma catalogação gráfica padronizada, composta por

representação simplificada em perspectiva axonométrica, parágrafo explicativo e código alfanumérico. O código indica a posição de cada solução na matriz multicritério, abrangendo a macrocategoria, a mesocategoria, a microcategoria e a ordem da estratégia catalogada.

Em seguida, realizou-se, por meio das versões gratuitas de três ferramentas baseadas em grandes modelos de linguagem — ChatGPT, NotebookLM e Gemini —, a análise e a representação dos mesmos projetos. Para assegurar a comparabilidade dos resultados, utilizaram-se os mesmos prompts em todas as ferramentas. Cada projeto foi submetido a dois procedimentos: primeiramente, à análise das pranchas para identificação das soluções de sombreamento; em seguida, a solicitação de representação gráfica simplificada das estratégias identificadas, em planta, corte ou perspectiva axonométrica.

As respostas geradas pelas ferramentas de IA foram submetidas à revisão humana, com o objetivo de identificar e excluir possíveis alucinações, informações falsas, incoerentes ou não relacionadas à microcategoria analisada. As soluções consideradas inválidas foram excluídas, enquanto as estratégias validadas foram comparadas entre si e com aquelas previamente identificadas pela análise humana.

2.2 Aplicação em 120 projetos

A comparação dos resultados no estudo piloto apontaram para o NotebookLM como identificador de um maior número de soluções projetuais; o ChatGPT destacou-se sobretudo na representação gráfica, com uma linguagem mais homogênea entre os desenhos gerados; e o gemini foi a ferramenta com menor quantidade de soluções identificadas, menor detalhamento nas respostas, e maior incidência de desvios interpretativos.

Na primeira etapa, optou-se pelo uso do NotebookLM para realizar a análise dos 120 projetos. Os projetos foram divididos em quatro notebooks, em decorrência do limite de 50 fontes por notebook para uso gratuito da ferramenta. Utilizou-se, em todos os notebooks, o seguinte prompt:

Analise as pranchas destes projetos premiados em concursos de Habitação de Interesse Social. Identifique quais soluções projetuais foram adotadas para proporcionar elementos de sombreamento aos ambientes de maior permanência da habitação, especialmente sala e quartos. Considere todas as informações disponíveis na prancha (plantas, cortes, fachadas, diagramas, perspectivas e textos explicativos). Liste as diferentes soluções projetuais encontradas e cite as evidências gráficas e textuais que comprovam cada estratégia.

Na segunda etapa, os resultados foram reunidos e comparados manualmente, gerando uma lista de 20 soluções apontadas pela IA. Cada uma dessas soluções passou por uma revisão humana com checagem diretamente nas pranchas dos projetos. Após esse controle de alucinações, informações falsas, incoerentes ou não relacionadas à microcategoria analisada, a lista de soluções foi reduzida para 14.

Para a terceira etapa optou-se pelo uso do ChatGPT para gerar representações gráficas de cada uma das estratégias. Foram enviadas todas as pranchas pontuadas pelo NotebookLM como fontes das soluções, a lista final de soluções com nome e descrição de cada uma,

além do seguinte prompt: “Gere uma representação gráfica simplificada para cada solução identificada — em planta, corte ou perspectiva axonométrica —, de modo a evidenciar, com clareza e objetividade, suas características essenciais.” Essa etapa também passou por verificação humana para correção de imagens com desvios.

Resultados e Discussões

Os resultados indicaram 14 soluções válidas com diferentes níveis de aplicabilidade, eficiência, custo e impacto estético (Figura 1):

1. Cobogós (Elementos Vazados): Utilizados extensivamente em fachadas (como Norte/Sul e Leste/Oeste) junto a salas e quartos para filtrar a luz solar direta sem impedir a ventilação.
2. Muxarabis: Tela externa que reduz a insolação e filtra a visão interna, permitindo que a janela de vidro interna permaneça aberta para ventilação.
3. Painéis Deslizantes e Venezianas Móveis: Sistemas de painéis deslizantes ou esquadrias com venezianas externas móveis, permitindo que o morador ajuste o nível de sombra conforme a necessidade.
4. Brises Ajustáveis: Elementos posicionados horizontalmente sobre as aberturas que podem ser regulados para bloquear ou permitir a entrada de sol dependendo do período do ano (verão ou inverno).
5. Painéis Basculantes: Utilização de painéis de madeira com função basculante integrados à grelha estrutural para prover sombra às aberturas.
6. Esquadrias Recuadas (Auto-sombreamento): Posicionamento do plano de vidro recuado em relação ao limite externo da fachada, criando uma proteção solar passiva através da própria geometria da edificação.
7. Varandas: Esta é a estratégia mais frequente, utilizando o recuo dos panos de vidro em relação à face externa da laje para criar uma barreira física contra a radiação direta. Projetos propõem profundidades que variam de 1,50 m a 2,40 m, garantindo que, no verão, a sala seja protegida da radiação solar.
8. Circulação Externa como Amortecimento: Uso de corredores de circulação externa (calçadas verticais) que funcionam como barreiras de sombreamento e zonas de transição térmica para os ambientes internos.
9. Fachadas com Trepadeiras: Estratégia de utilizar espécies vegetais trepadeiras que crescem sobre empenas e fachadas, atuando como um filtro térmico orgânico antes que o calor atinja a parede ou o vão.
10. Vãos Recuados com Floreiras: Estratégia comum para quartos, onde as janelas são recuadas em relação ao plano da fachada (ex.: 60 cm) e acompanhadas de floreiras embutidas que ajudam a filtrar a radiação direta.
11. Estores Exteriores: Utilização de estores de sombreamento pelo exterior, frequentemente em alumínio com enchimento termo isolante ou estores de rolo.
12. Toldos Verticais: Instalação de toldos no plano da fachada que, além de sombrear o ambiente, permitem a utilização das varandas e a secagem de roupa de forma resguardada durante o verão.
13. Beirais e Projeções Horizontais de Sombreamento: Projeções de laje que atuam como grandes anteparos horizontais, sombreando as fachadas e protegendo os ambientes internos da incidência solar direta e da chuva.

14. Palas de sombreamento: Instalação de elementos horizontais fixos (palas) projetados de forma robusta e especificamente posicionados nas fachadas críticas expostas à orientação Sul e Poente para barrar o sol direto nos horários desfavoráveis.

As limitações reveladas na identificação de soluções de sombreamento nos 120 projetos refletem erros semelhantes aos já presentes no estudo piloto. Recorrentes resultados apontam estratégias que não correspondem à microcategoria "Presença de elementos para sombreamento", como: "organização funcional da planta", "dupla orientação e ventilação cruzada" e "arborização como sistema de sombreamento das habitações". Esta última, embora possa impactar algumas esquadrias dos primeiros pavimentos, refere-se a praças ou canteiros próximos, e não a elementos projetados especificamente para a habitação.

Das 14 soluções catalogadas, seis (42,9%) foram identificadas exclusivamente em projetos de Portugal, três (21,4%), exclusivamente em projetos do Brasil, e cinco (35,7%), em projetos de ambos os países. Considerando também as soluções compartilhadas, foram encontradas 11 estratégias em Portugal e oito no Brasil (Tabela 1).

Conclusão

Este estudo demonstrou a viabilidade de integrar ferramentas de Inteligência Artificial (IA) para apoiar e otimizar processos de análise projetual e catalogação gráfica em Habitação de Interesse Social (HIS). A metodologia permitiu ampliar a análise manual e mapear com alta eficiência a totalidade de 120 projetos premiados no Brasil e em Portugal. Como resultado prático, a pesquisa sistematizou 14 estratégias recorrentes de sombreamento, fundamentais para o conforto térmico e a resiliência do ambiente construído. Quanto à origem da variedade de estratégias encontradas, 11 soluções estão presentes em projetos de Portugal e 8 soluções em projetos no Brasil. A catalogação visual dessas soluções oferece um repertório técnico relevante para a prática arquitetônica contemporânea.

Os resultados revelam que a IA mostra-se promissora como apoio técnico em processos de identificação e representação gráfica de estratégias arquitetônicas. A tecnologia acelerou significativamente a triagem de dados textuais e a estruturação de bases tridimensionais para os diagramas axonométricos. No entanto, para que esse potencial se reverta em precisão científica, é indispensável que a IA esteja inserida em protocolos metodológicos consistentes e submetida a uma validação humana rigorosa, para identificar e reduzir distorções interpretativas e filtrar alucinações.

Como contribuição para a continuidade desta linha de investigação, sugere-se para pesquisas futuras a ampliação da amostra para outras microcategorias de análise presentes na matriz multicritério original, como condicionamento do ar, sistemas estruturais e construtivos, e iluminação natural. Adicionalmente, propõe-se a comparação metodológica com novos modelos de IA, inclusive versões pagas ou ferramentas emergentes especializadas em interpretação visual.

Referências

BAZZAN, Ana L. C. et al. “A Nova Eletricidade”: Aplicações, Riscos e Tendências da IA Moderna. arXiv, out. 2023, p. 1-45. Disponível em: https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.18324. Acesso em: 11 maio 2026.

BEIGUELMAN, Giselle. Eugenia maquínica do olhar: visão computacional, etarismo e gênero. V!RUS. São Carlos, v. 1, n. 28, dez. 2024, p. 14-28. Disponível em: https://doi.org/10.11606/2175-974x.virus.v28.229584. Acesso em: 11 maio 2026.

Garcia, E. J.; Vale, B. Unravelling Sustainability and Resilience in the Environment; Routledge: New York, 2017.

GONZÁLEZ, Alberto Fernández. Desde Autómatas Celulares hacia IA y Fabricación. V!RUS. São Carlos, v. 1, n. 28, dez. 2024, p. 29-41. Disponível em: https://doi.org/10.11606/2175-974x.virus.v28.229569. Acesso em: 12 maio 2026.

REIS, F.; ORTEGA, C. D. O que é catalogação? Ciência da Informação em Revista, v. 11, jan. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.28998/cirev.2024v11e16293. Acesso em: 14 abr. 2026.

SILVA, Heitor; RODRIGUES, Clara; FARIAS, Hugo; SILVA, Felipe; SILVA, Maria. Resilience in social housing projects from architecture competitions in Portugal and Brazil (2013–2023): evaluating flexibility, environmental adequacy, and comfort. Sustainability, Basel, v. 17, n. 12, art. 5559, 2025. DOI: 10.3390/su17125559. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su17125559. Acesso em: 13 jun. 2026.

Anexos



Figura 1 – Representações gráficas das soluções identificadas. Fonte: elaborado pelos autores.



Tabela 1 - Origem das soluções encontradas. Fonte: elaborada pelos autores.

CÓDIGO: HS0919

AUTOR: ANA CLARA TAVARES MAIA RIBEIRO

ORIENTADOR: GEORGE ALEXANDRE FERREIRA DANTAS

TÍTULO: Visões sobre a cidade: a questão urbana nos debates da Câmara Municipal de Natal durante a gestão Djalma Maranhão (1956-1964)

Resumo

Este trabalho analisa as diversas perspectivas acerca da cidade de Natal e as tentativas de ordenamento da cidade durante as gestões de Djalma Maranhão (1956-1960 e 1960-1964), tendo como fontes principais os periódicos disponíveis na Hemeroteca digital e as atas da Câmara Municipal. A pesquisa expandiu suas fontes primárias e objetos de estudo para desenvolver e aprofundar a análise das visões de cidade e dos debates que permearam e pautaram o desenvolvimento de Natal na segunda metade da década de 1950 e nos primeiros quatro anos da década de 1960. A metodologia adotada baseia-se na análise de fontes primárias, como atas da Câmara Municipal de Natal, periódicos da época, crônicas e discursos parlamentares, à luz do referencial teórico da História Cultural. Os resultados indicam que as discussões e atuações dos poderes municipais potiguares nesse período promoveram um espaço de consolidação e afirmação do municipalismo, voltando o debate para as mais diversas carências urbanas de Natal. O estudo revela que a gestão de Maranhão articulava uma visão nacionalista e democrática nas áreas de educação, cultura popular e infraestrutura urbana, com base na participação da população, e que, mesmo contemplando um viés progressista e sendo reconhecido e prestigiado por sua gestão, o ex-prefeito não ficou isento de críticas e cobranças. O texto discute como essas perspectivas apontam também para a questão urbana e para a tentativa de construir uma cidade emancipada e mais justa.

Palavras-chave: Câmara Municipal. Gestão municipal. Djalma Maranhão. Visão de Cidade.

TITLE: Visions of the City: The Urban Issue in Debates at the Natal City Council During the Djalma Maranhão Administration (1956–1964)

Abstract

This study analyzes the various perspectives regarding the city of Natal and the attempts to organize the city during the administrations of Djalma Maranhão (1956–1960 and 1960–1964), drawing primarily on periodicals available in the digital newspaper archive and City Council minutes. The research expanded its primary sources and objects of study to develop and deepen the analysis of visions for the city and the debates that

shaped Natal's development during the second half of the 1950s and the first four years of the 1960s. The methodology is based on the analysis of primary sources—such as Natal City Council minutes, period newspapers, chronicles, and parliamentary speeches—through the theoretical lens of Cultural History. The results indicate that the discussions and actions of local municipal authorities during this period fostered an environment for the consolidation and assertion of municipalism, focusing the debate on Natal's diverse urban needs. The study reveals that Maranhão's administration articulated a nationalist and democratic vision regarding education, popular culture, and urban infrastructure, grounded in public participation; however, despite his progressive stance and the acclaim his administration received, the former mayor was not immune to criticism and demands. The text also discusses how these perspectives address urban issues and the attempt to build a city that was both emancipated and fairer.

Keywords: Municipal Council. administration. Djalma Maranhão. City Vision

Introdução

O presente plano, "Visões sobre a cidade: a questão urbana nos debates da Câmara Municipal de Natal durante a gestão Djalma Maranhão (1956-1964)", vinculado à pesquisa "Ruínas & Escombros da modernidade: arquitetura, reformas e cultura urbana", desenvolvida no âmbito do grupo História da Cidade, do Território e do Urbanismo (HCUrb), propõe aprofundar as investigações iniciadas no primeiro ano da pesquisa. Se a etapa anterior se deteve na análise preliminar das atas legislativas e na compreensão inicial da visão de cidade do ex-prefeito Djalma Maranhão, este segundo ciclo debruça-se ainda mais sob o imaginário urbano e propõe novas visões a serem consideradas. Busca-se, examinar as perspectivas do Poder Legislativo e da imprensa potiguar em face da referida gestão, com o intuito de não só aprofundar o conhecimento sobre o imaginário urbano natalense e as estratégias de enfrentamento das problemáticas urbanas pelos poderes municipais, mas também discutir contrapontos à visão de Maranhão. Os periódicos destacam-se como fontes documentais essenciais, uma vez que retratavam as múltiplas disputas políticas, econômicas e intelectuais que repercutiam na esfera local. Amparando-se no texto de Melo (1987), é possível delinear o perfil editorial dos principais jornais mobilizados nesta pesquisa: O Diário de Natal, cuja linha editorial fundamentava-se na defesa da liberdade de informação, nos interesses comunitários e nos princípios democráticos; A Tribuna do Norte, que alicerçava seus ideais nas premissas de progresso, desenvolvimento e justiça social. No que se refere aos jornais O Poti e A Ordem, embora a referida literatura não detalhe seus expedientes técnicos, os documentos evidenciam que a imprensa local estava imersa em um contexto de sociabilidade intelectual e religiosa. A pesquisa amparou-se nos pressupostos teóricos da História Cultural. A análise das fontes primárias viabilizou o entendimento e construção das perspectivas sobre a cidade de cada ator ou agente estudado. É justamente nessa análise que foi essencial o amparo em conceitos da história cultural para entender os imaginários urbanos em disputa durante os mandatos de Maranhão (1956-1960 e 1960-1964) e o modo como essas representações nortearam a produção do espaço urbano. Para fundamentar o conceito de cidade imaginada, esta pesquisa ampara-se nas formulações do historiador Adrián Gorelik (2004). O autor define os imaginários urbanos como: "imaginários urbanos como reflexão cultural (...) sobre as mais diversas maneiras pelas quais as sociedades se representam nas cidades [...], e imaginário urbano como dimensão de reflexão político-técnica (...) sobre como a

cidade deveria ser (Gorelik, 2004, p. 259 e 260).” A pesquisa tem como objetivo geral a sistematização de dados e o levantamento de novas fontes, estruturando um quadro dos eventos, ações, políticas públicas e debates técnicos produzidos no âmbito da Câmara Municipal de Natal entre 1956 e 1964. Estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos: transcrever e sistematizar documentos oficiais, com ênfase nas atas da Câmara Municipal de Natal; realizar o levantamento de novos periódicos e acervos referentes a Maranhão; analisar os discursos do gestor para reconstruir suas representações e compreender sua visão de cidade; mapear as intervenções urbanísticas e sociais executadas em sua gestão. O presente plano trabalha integra os esforços do grupo HCUrb, resultando em colaborações com outros projetos. Um dos resultados desses trabalhos em conjunto foi o desenvolvimento em coautoria do artigo intitulado "Entre Atas e Debates: a reorganização dos poderes municipais: (Natal,1948-1960)" (Dantas, et al., 2026), o qual se debruçou sobre a atuação institucional e a reorganização dos poderes municipais na capital potiguar. Esse direcionamento viabilizou a compreensão das múltiplas visões de cidade que pautaram e tensionaram, de maneira direta ou indireta, as tentativas de ordenamento de Natal entre os anos de 1956 e 1964

Metodologia

Esta pesquisa fundamentou-se em uma metodologia que articula e analisa múltiplas fontes documentais. A revisão bibliográfica, centrada na história urbana e política de Natal no século XX, dedicou especial atenção à historiografia referente a Djalma Maranhão. No âmbito das fontes oficiais, procedeu-se ao levantamento, à transcrição e ao estudo das atas da Câmara Municipal de Natal relativas aos anos de 1948, de 1950 a 1958 e de 1963, o que viabilizou o mapeamento dos debates legislativos e das intervenções do poder público. Realizou-se, também, um levantamento na Hemeroteca Nacional, com ênfase no acervo da Tribuna do Norte durante o último ano da pesquisa, somado aos periódicos já analisados anteriormente - Diário de Natal, A Ordem e O Poti - para compreender a repercussão das questões urbanas e políticas na esfera pública. A metodologia abrangeu, ainda, o exame de fontes primárias de autoria do próprio Djalma Maranhão, tais como suas crônicas, cartas de exílio, discursos parlamentares e sua obra sobre Câmara Cascudo, com o objetivo de investigar e entender seu imaginário e suas representações acerca da cidade. Os dados extraídos foram sistematizados em planilhas digitais, viabilizando o cruzamento de informações e a estruturação da análise sobre a "visão de cidade" do gestor sob a ótica do referencial teórico da História Cultural. Concomitantemente, elaborou-se uma linha do tempo contrapondo as transcrições das atas às notícias veiculadas na imprensa, permitindo uma análise comparativa entre as deliberações parlamentares, as ações executivas e as repercussões na esfera pública. O recorte temporal trabalhado com o levantamento das atas inicia-se em 1948 e avança até 1963. Contudo, além do levantamento, há a organização dos documentos, bem como sua transcrição e posteriormente análise e sistematização de todo o conteúdo. Devido a esses procedimentos, a linha cronológica das atas legislativas contemplou apenas o período de 1948 a 1956. Por sua vez, no que tange à organização das fontes e informações relativas a Djalma Maranhão, o recorte temporal investigado estendeu-se de 1948 a 1979. Durante a execução das pesquisas referentes a este plano de trabalho, a investigação passou por alguns desafios metodológicos que impuseram readequações no cronograma e nas estratégias de coleta de dados. A análise das fontes primárias, notadamente as atas da Câmara Municipal, foi dificultado por obstáculos paleográficos, pela deterioração física dos documentos e pela desorganização do acervo, limitando o

volume de digitalização apenas ao período de 1948, 1950 a 1958 e ao ano de 1963. Diante de tais obstáculos, a estratégia adotada foi priorizar os registros correspondentes às gestões de Maranhão (1956-1960 e 1960 a 1964), cuja caligrafia mais clara permitiu o emprego de ferramentas de inteligência artificial, como o Gemini, no auxílio às transcrições. No que concerne à segunda gestão do prefeito, apenas o ano de 1963 pôde ser contemplado, por ser o único ano de 1960 a 1964 disponível e legível. O acesso aos arquivos físicos impôs barreiras adicionais, a exemplo da dificuldade de agendamento de visitas à Câmara Municipal, resultando na obtenção das atas de 1963 apenas em junho de 2026. Grande parte do material digitalizado necessita de transcrição devido ao tempo demandado para a revisão criteriosa dos resultados gerados pela inteligência artificial, somado às limitações técnicas e de créditos da ferramenta. Por conseguinte, referentes à primeira administração de Maranhão, apenas os anos de 1956 e 1958 foram integralmente digitalizados, lidos e transcritos, gerando uma lacuna informacional técnica que, se preenchida futuramente, enriquecerá ainda mais a pesquisa. O acesso aos repositórios digitais também se revelou desafiador devido à instabilidade do servidor do Laboratório de Imagens da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Labim) e à digitalização incompleta do acervo do jornal A República na Hemeroteca Digital. O armazenamento dos documentos digitalizados em nuvem também apresentou falhas técnicas, ocasionando o salvamento incorreto ou problemas de carregamento que resultaram na perda e desorganização de alguns arquivos de imagem.

Resultados e Discussões

O cenário urbano de Natal anterior à década de 1950 foi marcado por dinâmicas conturbadas, decorrentes do centralismo autoritário do Estado Novo e dos impactos diretos da crise do pós-guerra. Nesse contexto, a cidade enfrentou um rápido crescimento populacional, o qual exerceu pressão sobre a infraestrutura local e desencadeou uma crise habitacional. Tais condições se expressavam em um quadro político e administrativo instável, caracterizado por sucessivos mandatos executivos de curta duração, conforme evidenciado no Quadro 1. A chefia do Poder Executivo da capital iniciou um processo de estabilização durante a gestão de Sylvio Pedroza, consolidando-se, de fato, com a primeira administração de Djalma Maranhão (1956-1959) e sua subsequente eleição em 1960. Como tem apontado as pesquisas desenvolvidas no âmbito do HCUrb, o grande marco político após esse período de instabilidade institucional foi a reinstalação definitiva da Câmara Municipal de Natal, em 1948. A partir desse evento, o Poder Legislativo retomou suas competências constitucionais e ampliou substancialmente sua atuação fiscalizadora. A Câmara se consolidaria, a partir de então, como o principal local institucional para o debate sobre o ordenamento do território, a expansão da infraestrutura e a mitigação das carências sociais da capital potiguar. Historicamente, o Brasil vivenciou longos períodos de restrição e sufocamento das decisões locais pelas esferas estaduais e federais. Com a promulgação da Constituição de 1946, que restabeleceu o princípio da autonomia municipal, o papel dos poderes locais foi reconfigurado, passando a atuar como mediadores diretos das urgências urbanas. Enquanto a Câmara acolhia as demandas cotidianas dos bairros e fiscalizava a alocação de recursos, o Executivo elaborava e executava as políticas públicas. A consolidação desse espaço deliberativo local foi fundamental para preparar o terreno político que viabilizaria gestões de apelo participativo e popular nos anos seguintes (Dantas, et al, 2026). É nesse cenário de redemocratização que ganha força o ideal do municipalismo. Matsumoto et al. (2012, p.

32) define o municipalismo como: “uma forma de organização ou desenho político-institucional que tende a conceber a esfera local como a mais eficiente para dar solução a uma série de problemas da vida em comunidade e que, para esse objetivo, demanda uma esfera política autônoma de ação, incluindo recursos fiscais e administrativos.” Sob esse viés, os debates em escala local constituem, a princípio, o meio mais eficiente para a resolução das demandas urbanas. Nesse contexto, a Câmara Municipal de Natal afirmou-se efetivamente a partir de 1948 com o propósito de mediar as necessidades mais imperativas da população e se envolveu em discussões mais abrangentes, como as tentativas e desafios de disciplinar o crescimento da capital. À medida que o Poder Legislativo conquistava maior autonomia, o Poder Executivo natalense também era impactado positivamente pelos desdobramentos do municipalismo. Esse processo atingiu seu ápice em 1960, quando Djalma Maranhão (1915-1971) tornou-se o primeiro prefeito de Natal eleito pelo voto direto. Tendo ocupado a chefia do Executivo em duas gestões (1956-1959 e 1961-1964) e atuado como jornalista e deputado federal, Maranhão teve sua trajetória moldada pelo engajamento político desde a juventude, com destaque para sua participação no Partido Comunista Brasileiro (PCB) na Revolução de 1930. Sua administração representou de maneira direta sua matriz ideológica democrática e nacionalista. Consequentemente, sua visão de cidade desdobrou-se em suas diferentes frentes de atuação pública (Fundação José Augusto, s.d.). Djalma Maranhão pautou sua trajetória política pela valorização do cotidiano e da cultura popular. Partindo desse princípio, em 1949, o jornal Diário de Natal publicou uma série de reportagens e crônicas de sua autoria sobre a esquina da rua Tavares de Lira com a rua Dr. Barata, posteriormente compiladas e publicadas em livro. Nesses textos, o futuro prefeito retratou as dinâmicas e histórias que permeavam as ruas do bairro da Ribeira, revelando sua perspectiva sobre a sociedade natalense da época Na crônica “O Desfile da Onça”, Maranhão denunciou a cidade real, caracterizada pelo abandono e pela insalubridade, contrastando-a com a percepção ingênua por parte da população diante desse quadro de deterioração urbana. Essa crítica é representada na cena em que o personagem Zé Areias toma banho em um esgoto quebrado: “[...] corria de um lado para o outro, até que encontrou o esgoto da sapataria A Fidalga arrebentado, metendo-se debaixo do cano furado, tomando um banho formidável, que pelo menos serviu para curtir a ressaca… (Maranhão, 2004)” O autor retratou a pobreza e carência de conhecimento sanitário da população ao apontar a inocência de Zé Areias frente à insalubridade do espaço urbano, consequência de sua condição socioeconômica desfavorecida e da ausência de acesso à educação básica. Essa representação crítica sobre o abandono da infraestrutura da capital antecedeu e fundamentou as ações futuras de Maranhão como chefe do Executivo. Em suas gestões, priorizou-se o investimento em obras de infraestrutura voltadas, especialmente, para as regiões periféricas e carentes, a exemplo das intervenções de urbanização em Mãe Luiza e nas Rocas. Sobre Mãe Luiza, o periódico O Poti noticiou, em janeiro de 1958, a aprovação de loteamentos e da venda de terrenos. Os recursos arrecadados com essas vendas foram debatidos no âmbito legislativo para financiar o calçamento e projetos de melhoramento de praças e urbanização do bairro, na tentativa de ordenar seu crescimento. Em relação ao bairro das Rocas, o mesmo periódico publicou, em setembro de 1956, um texto descrevendo um passeio imaginário pela região. O autor, Luiz Cordeiro, destacou os recentes projetos de arborização e calçamento implementados no local, ressaltando a atuação do prefeito: “Finalmente agora será concretizado este velho sonho através do dinamismo do prefeito. para Djalma Maranhão, que muito tem trabalhado no sentido de acelerar o progresso de Natal, especialmente o bairro das ROCAS, onde S. S. tem correspondido sobejamente a expectativa de todos os seus moradores.” O texto não

apenas evidencia a materialização das obras públicas sob a administração de Djalma Maranhão, mas também expõe a aprovação popular diante da efetividade da gestão em responder às demandas da comunidade, expressando seu caráter municipalista. A intervenção em um bairro historicamente negligenciado como as Rocas reitera o compromisso do gestor com a parcela mais vulnerável da população, corroborando a visão de cidade já antecipada em crônicas como a de Zé Areias. Djalma Maranhão também descreve em muitas de suas crônicas a sua cidade imaginada, um espaço de sociabilidade democrática e de forte cultura popular. O lugar principal em que se focaliza essa visão é a esquina da Avenida Tavares de Lira com a Rua Dr. Barata, que Maranhão descreve não como um simples local de passagem, mas como uma “espécie de universidade popular” e uma “verdadeira fonte irradiadora de informações”. O ex-prefeito refere-se à esquina como um lugar de “heterogeneidade exuberante”, valorizando esse espaço público como um local de encontro, diversidade e exercício da cidadania. Essa representação da rua como o núcleo da vitalidade cultural e política da cidade serviu de base ideológica para o seu projeto de administração municipal. Posteriormente, essa concepção de espaço urbano materializou-se em políticas públicas, a exemplo da criação das “Praças de Cultura” e da implementação da campanha de alfabetização “De Pé no Chão Também se Aprende a Ler”, consolidando um modelo de gestão urbana voltado para a emancipação social. A campanha “De Pé no Chão Também se Aprende a Ler” foi o projeto de maior repercussão de sua gestão. Conforme relata Gois (1999), a iniciativa transcendia a mera alfabetização, configurando-se como um esforço que visava a emancipação popular. O propósito central da iniciativa transcendia a alfabetização formal, concebendo a educação como um instrumento para o desenvolvimento da criticidade democrática e da conscientização popular. É essencial entender que, para a Constituição de 1946 (vigente à época), os analfabetos eram destituídos do direito ao voto. Nesse contexto de exclusão institucional, o ato de aprender a ler assumia um caráter político. Dessa forma, a campanha desenvolvida na gestão de Djalma Maranhão estruturava-se como um projeto de emancipação política e social voltado à formação de um senso crítico da população, tornando os indivíduos politicamente conscientes e aptos a reivindicar seu direito à cidade e contestar os poderes públicos (Gois, 1999). O material didático refletia o imaginário político do prefeito com frases adotadas no processo de alfabetização, a exemplo de “o voto é do povo”, ilustram o princípio de "educar para a Democracia" que a campanha objetivava. A urgência por esse modelo de ensino democratizante é sintetizada por Gois (1999): “Fica claro, portanto, o mais profundo sentido dialético da revolução popular que não é um fim, porém um meio de conseguir a libertação total do povo, fazendo-o construtor do seu destino e NENHUM POVO É DONO DO SEU DESTINO SE ANTES NÃO É DONO DE SUA CULTURA"(Esta foi a síntese da intervenção definindo o ponto de vista sobre cultura popular, apresentada pelo professor Geniberto Campos, refletindo o pensamento da Campanha de Pé no Chão Também se Aprende a Ler, no 1° Encontro de Alfabetização e Cultura Popular, realizado no Recife, em 1963, sob os auspícios do Ministério de Educação e Cultura).” Do ponto de vista espacial, as “Escolinhas” da campanha consistiam em soluções simples e participativas, dispensando a construção de prédios formais. Elas operavam em espaços cedidos gratuitamente pelas próprias comunidades, atendendo a um apelo da municipalidade. Em áreas de maior densidade demográfica, adotou-se a estrutura de “Acampamentos Escolares”, compostos por grandes galpões erguidos com materiais regionais de baixo custo — como palha de coqueiro e barro batido —, definidos por Djalma Maranhão como uma “construção autenticamente obra de Cultura Popular”. Essa inserção estratégica no núcleo das comunidades visava facilitar o acesso direto ao ensino (Gois, 1999). Em paralelo, a

cultura popular era concebida por Maranhão (1999) como a essência da identidade de Natal. Em sua obra dedicada a Câmara Cascudo, o gestor argumenta que "a defesa do Folclore Brasileiro implica na legítima defesa da Cultura Popular". Sob essa premissa, sua administração promoveu a revalidação do folclore local mediante a restauração de autos populares e a concessão de apoio financeiro a diversos conjuntos folclóricos, visando à sua perpetuação. No plano urbanístico, essa valorização cultural materializou-se por meio das Praças de Cultura, em 1962. Mais do que meras áreas de lazer, tratavam-se de complexos integrados por parque infantil, quadras esportivas e uma biblioteca popular. Como retratou Ribeiro (2008), tais espaços livres foram projetados como centros de convivência voltados à democratização do acesso à cultura e ao lazer, com programações que incluíam feiras de livros, música e exposições. Até o final do governo de Djalma Maranhão, funcionaram em Natal quatro praças de cultura específicas: Praça de Cultura Periódica, Localizada na Praça Kennedy, Cidade Alta, funcionando de forma periódica durante eventos promovidos pela prefeitura; Praças de Cultura Permanentes nas Quintas e nas rocas, com as bibliotecas Biblioteca Popular Castro Alves e Monteiro Lobato, respectivamente; Praça de Cultura André de Albuquerque, na Cidade Alta, e modificada em 1963 para abrigar uma Galeria de Arte, uma Concha Acústica, uma Biblioteca Popular (José de Alencar), mesas de leitura ao ar livre e tela para projeção de filmes. Essa intervenção representava a concretização da "cidade imaginada" delineada nas crônicas de Maranhão, nas quais o espaço público assumia a função de uma verdadeira "universidade popular". Essa capacidade de materializar as demandas populares no espaço urbano conferiu a Djalma Maranhão não apenas o apoio das massas, mas também o respeito da elite técnica do planejamento potiguar. A chancela dessa eficiência pode ser verificada em uma mensagem divulgada pelo jornal Tribuna do Norte, em março de 1961, redigida por Omar O'Grady - ex-prefeito e engenheiro responsável pela primeira grande modernização e pelo Plano Geral de Sistematização de Natal na década de 1920. Na publicação, O'Grady profere: "Receba digno Prefeito efusivas felicitações pela sua brilhante administração com prosseguimento da eficiente tarefa em benefício de nossa estimada cidade". Essa interlocução evidencia que o urbanismo de base popular e participativa implementado por Maranhão não representava uma ruptura com a racionalidade técnica, sendo validado inclusive por figuras conservadoras de administrações anteriores. Na prática, a gestão de Maranhão operou uma expansão do modelo de "cidade moderna" e da eficiência administrativa, historicamente restritas aos bairros centrais como Tirol e Petrópolis, inserindo os territórios carentes no mapa do planejamento de Natal. Apesar do reconhecimento de suas ações, as intervenções urbanísticas de Djalma Maranhão enfrentaram oposição de intelectuais como Paschoal Carlos Magno, então Secretário Geral do Conselho Nacional de Cultura, o qual reprovou a inserção de infraestruturas de grande porte em áreas de lazer pré-existentes. O Secretário criticou a descaracterização do tecido urbano tradicional pela alocação da rodoviária e do ginásio na Praça Pedro Velho, Magno acusou publicamente a gestão de promover a "mutilação das praças" (Diário de Natal, 15 fev. 1963). Ancorado em parâmetros do urbanismo internacional, Magno defendia a preservação irrestrita dos espaços verdes. Em sua argumentação, destacou o modelo inglês de respeito irrestrito aos espaços verdes, definindo o jardim como o "pulmão por onde respira uma população". Pressionado pelas críticas, Maranhão comprometeu-se a ajardinar a praça adjacente à Casa do Estudante, na tentativa de mitigar os impactos de suas intervenções e reintegrar a área ao desenho urbano da capital (Diário de Natal, 15 fev. 1963). Se por um lado o Executivo expandia suas frentes de intervenção territorial, por outro, essa mesma dinâmica cresceu a ponto de desafiar e tensionar a capacidade da Câmara Municipal de fiscalizar e mediar esses

processos. Ao analisar as atas, percebe-se que os vereadores expressavam as preocupações sobre os desafios de uma cidade em crescimento. Nos registros de agosto de 1948, eram frequentes os debates sobre a estrutura de poder e a competência do Legislativo - a exemplo da discussão acerca da legalidade dos subsídios dos vereadores, um embate possivelmente motivado pela afirmação da autonomia da Câmara perante o Executivo. Essa tensão repete-se nos anos seguintes, em que houve momentos em que a opinião do Executivo divergia da opinião de alguns parlamentares (Dantas, et al, 2026). Sob a perspectiva teórica do municipalismo, esse tensionamento institucional não deve ser interpretado como uma disfunção, mas sim como a expressão da vitalidade democrática. As divergências entre o Executivo e o Legislativo refletem a pluralidade de interesses que compõem o espaço urbano e a fiscalização dos poderes. É justamente por meio desse embate, onde os projetos são submetidos a votação e ao debate público, que se evita a unilateralidade das decisões, garantindo que as políticas locais sejam aprimoradas para atender de maneira mais efetiva às reais necessidades da coletividade (Pereira, 2006). As atas do período de 1948 a 1963 demonstram a consolidação da Câmara como espaço de fiscalização, debate e representação das demandas populares, fortalecendo o municipalismo. A análise das atas de agosto de 1956, primeiro ano da gestão de Djalma Maranhão, evidencia que o ex-prefeito submeteu à apreciação da Câmara proposições de apelo social e cultural, a exemplo da construção do Mercado das Rocas, da criação do conselho de turismo, da concessão de auxílios a escolas e ao teatro e da conclusão da Biblioteca Municipal no Alecrim. O Executivo também manifestou preocupação com a ordenação do uso do solo, promovendo consultas técnicas para a instalação de equipamentos urbanos (como as “cigarreiras”) e a gestão de concessões comerciais, exemplificada pelo arrendamento do quiosque “O Quitandinha” (Dantas, et al, 2026). Nos primeiros anos da primeira gestão, o Legislativo opôs pouca resistência aos projetos do Executivo, visto que Maranhão adotou uma postura moderada comparada a sua segunda gestão, marcada por iniciativas mais ousadas para a época, como as Praças de Cultura, o programa “De pé no chão também aprende a ler” e desapropriações voltadas a um plano de reformas urbanas e agrárias em Natal. A administração municipal em períodos anteriores encarava a expansão das favelas e as condições precárias de moradia sob uma ótica higienista, muitas vezes estigmatizando a pobreza urbana e exigindo intervenção direta do Estado, a gestão de Djalma Maranhão, buscou seguir um viés diferente para essa abordagem. Em 1962, a administração municipal propôs “humanizar o terrível problema de uma favela em formação, dando condições de salubridade e higienização” a centenas de famílias, por meio de decretos de desapropriação voltados à Reforma Urbana e Agrária na capital (Tribuna do Norte, 23 jun. 1962). Para blindar o processo contra a especulação imobiliária, a Prefeitura impôs o princípio do usufruto restrito, determinando que os lotes e as casas doadas “não poderão ser vendidos ou alugados, passando de pai para filho”. A medida visava coibir o histórico vício de loteamentos anteriores, a exemplo do que ocorrera em Santos Reis, onde beneficiários de parentes empobrecidos acabavam comercializando os terrenos por valores irrisórios. Diante dos empecilhos políticos e das pressões contrárias, a postura do prefeito Djalma Maranhão era de irredutibilidade e confronto retórico. Questionado pela imprensa sobre a gravidade das desapropriações e a urgência das medidas, o chefe do Executivo foi incisivo ao afirmar que: “É irreversível o meu ato [...] não mais recuará, sejam quais forem os óbices.” (Tribuna do Norte, 23 jun. 1962). Para operacionalizar tal diretriz, a prefeitura estruturou Grupos de Trabalho de alto nível, como denominou a imprensa local, integrando secretarias municipais, órgãos estaduais de desenvolvimento e lideranças políticas alinhadas, com o intuito de proceder aos levantamentos topográficos e à distribuição planejada de lotes para as famílias carentes.

Se, por um lado, a imprensa e os setores reformistas viam na firmeza do prefeito uma demonstração de seriedade diante do subdesenvolvimento urbano, por outro, a materialidade dessas desapropriações no território gerou imediato atrito com parte da população potiguar e repercutiu intensamente no Legislativo Municipal. A aplicação prática do plano urbanístico esbarrava em conflitos diretos de desocupação e remoção, bem como com vieses políticos e interesses econômicos da elite, expressas em periódicos como A Ordem. Nas atas da Câmara Municipal de maio e agosto de 1963, essa situação passou para o debate parlamentar, com denúncias de que moradias estariam sendo sumariamente derrubadas por ordem do poder público. A reação dos vereadores evidenciou o papel da Câmara como local de contestação e fiscalização, culminando na exigência de criação de comissões interpartidárias para confrontar diretamente o prefeito e frear os problemas percebidos na execução das obras.

Conclusão

O presente plano de trabalho atingiu seus objetivos, partindo do entendimento do municipalismo (Pereira, 2006) e do imaginário urbano proposto por Adrián Gorelik (2004), para avançar na compreensão das diversas visões em disputa e das tentativas de ordenamento territorial no cenário natalense durante as duas gestões de Djalma Maranhão. Em relação aos desafios metodológicos inerentes ao trato com acervos físicos e às limitações técnicas nas ferramentas de transcrição, a investigação buscou articular com rigor as atas do Legislativo, os periódicos da época e as produções intelectuais do próprio ex-prefeito. Cumpriu-se a meta de delinear não apenas o projeto político e social emancipatório concebido pelo Chefe do Executivo para a capital potiguar, mas também as tensões institucionais, os contrapontos e as frentes de oposição na Câmara Municipal e na imprensa ao longo desse recorte temporal. A prática administrativa de Maranhão materializou uma visão eminentemente democrática, nacionalista e emancipatória, traduzida em intervenções urbanísticas de forte apelo popular. A análise evidenciou que seu modelo de gestão se alicerçava na educação como vetor de criticidade cívica, na cultura como instrumento de apropriação do espaço público e no urbanismo direcionado à justiça social, concretizando as ideias expressas em seus livros e discursos encontrados em periódicos disponíveis na Hemeroteca Nacional. Todavia, emergiu a constatação de que a efetivação dessa cidade imaginada - concretizada em medidas como a Reforma Urbana e Agrária - gerou vários atritos socioterritoriais. Tais ações suscitaram intensa reação institucional, consolidando o Legislativo potiguar como um espaço ativo de contestação e mediação dos conflitos urbanos, evidenciando que a participação popular se vinculava às disputas pelo direito à cidade. Por fim, este estudo sinaliza a necessidade de adensamento dos dados e informações já coletados e apontados neste relatório para aprofundamento futuro. A revisão e a transcrição das atas legislativas pendentes – notadamente as que contemplam a segunda gestão do prefeito – permitirão elucidar com maior precisão os embates parlamentares deflagrados por projetos polêmicos. Perspectivas futuras apontam para a investigação das lacunas documentais que não puderam ser acessadas até o presente momento, decorrentes de instabilidades nos repositórios digitais, por exemplo. A busca por novas fontes administrativas e por informações provenientes da Hemeroteca Nacional constitui outra possibilidade de estudo. Ademais, é apontado um campo para investigações ulteriores focadas nas disputas ideológicas e de memória urbana do território natalense - a exemplo das desapropriações - bem como no sistemático

apagamento do legado de Djalma Maranhão da paisagem física e da consciência coletiva de Natal em decorrência do golpe de 1964.

Referências

ACERVO CÂMARA MUNICIPAL DE NATAL. Atas das sessões ordinárias, Natal, entre 1948 e 1963 [Base de dados do HCUrb]. A ORDEM. Natal. 1951-1964. Disponível em: <http://bndigital.bn.br/hemeroteca-digital/>. DANTAS, George A. F.; BEZERRA, Mayse de O.; RIBEIRO, Ana C. T. M. Entre atas e debates: o Legislativo e Executivo natalenses e a produção do espaço: uma análise das transformações socioespaciais de Natal por meio dos debates da Câmara Municipal (1948–1960). In: SEMINÁRIO DE HISTÓRIA DA CIDADE E DO URBANISMO – PENSAR FORA O EIXO, 19., 2026, Maringá. Anais [...]. Maringá - PR, 2026. Eixo Temático 02. Disponível em: https://www.19shcu.com.br/. No prelo. DANTAS, George A. F.; PELLENSE, Magnus C.; NASCIMENTO, Natália M.; CADÓ, Júlia C. de A. Reformas, gestão e higiene da cidade: tentativas de ordenamento dos serviços e da expansão urbana (Natal, Brasil, nos anos 1940). III Congreso Iberoamericano de História Urbana, Actas del III Congresso, Madrid, Universidad Complutense de Madrid, 2022 [Actas aguardando publicação online] DIÁRIO DE NATAL. Natal. 1948-1989. Disponível em: <http://bndigital.bn.br/hemeroteca-digital/>. FUNDAÇÃO JOSÉ AUGUSTO. Djalma Maranhão. Natal: Fundação José Augusto, s.d. Disponível em: Djalma Maranhão - Fundação José Augusto .pdf. Acesso em: ago. 2025. GOIS, Moacyr de. 2 livros de Djalma Maranhão no exílio. Natal: Prefeitura Municipal do Natal, 1999 GORELIK, Adrián. Miradas sobre Buenos Aires: Historia cultural y crítica urbana. Madrid: Siglo XXI de España Editores, 2024. MARANHÃO, Djalma. Pensamento Político. [S.I.]: CERN, 1985. MARANHÃO, Djalma. Cascudo - Mestre do Folclore Brasileiro. Natal: Sebo Vermelho, 1999. MARANHÃO, Djalma. Esquina da Tavares de Lira com a DR. Barata, Centro Convergente e Irradiador da Vida Norte-riograndense. Organização de Claudio Galvão. Natal: Sebo Vermelho, 2004. MATSUMOTO, Carlos Eduardo Higa; FRANCHINI, Matías; MAUAD, Ana Carolina Evangelista. Município: palco da vida – a história do municipalismo brasileiro. v. 1. Brasília: Confederação Nacional de Municípios, 2012. MACHRY, Marcos Santos. O horizonte nacionalista de esquerda e a Revista Brasiliense (1955-1964): sociabilidade intelectual e linguagem política. 2017. 208 f. Dissertação (Mestrado em História) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. MELO, Manoel Rodrigues de. Dicionário da imprensa no Rio Grande do Norte: 1907-1987. São Paulo: Cortez; Natal: Fundação José Augusto, 1987. MORAES, Lincoln. Djalma Maranhão: roteiro para uma bibliografia. Natal: [s. n.], 1995. OLIVEIRA, Alessandra. As experiências em torno da festa e a crise do urbano. In: SEMINÁRIO DE HISTÓRIA DA CIDADE E DO URBANISMO, 18°, 2024, Natal. Anais [...]. Natal: UFRN, 2024. Disponível em: www.even3.com.br/anais/18-shcu-seminario-historia-cidade-urbanismo. Acesso em: ago. 2025. O POTI. Natal. 1955-1985. Disponível em: <http://bndigital.bn.br/hemeroteca-digital/>. PESAVENTO, Sandra. História e História Cultural. São Paulo: Autêntica, 2003. PEREIRA, Margareth da Silva. A construção histórica dos sentidos das palavras: Municipio e municipalismo: dois séculos de lutas políticas e linguísticas. In: SEMINÁRIO DE HISTÓRIA DA CIDADE E DO URBANISMO, 9°, 2006, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ANPUR, 2006. Disponível em: https://anpur.org.br/anais-shcu-i-a-xv/. Acesso em: 3 abr. 2026. RIBEIRO, Isa Paula Zacarias. As Praças de Cultura no governo Djalma Maranhão (1960-1964). 2008.

121 f. Dissertação (Mestrado em História) – Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. TRIBUNA DO NORTE. Natal. 1951-1964. Disponível em: <http://bndigital.bn.br/hemeroteca-digital/>.

Anexos



IMAGEM DE UMA DAS ATAS



IMAGEM DE UMA DAS MATÉRIAS REFERENTES A MARANHÃO



IMAGEM DE ATA DANIFICADA



CAPA DO RELATÓRIO



RELATÓRIO - PÁG. 1



RELATÓRIO - PÁG. 2



RELATÓRIO - PÁG. 3



RELATÓRIO - PÁG. 4



RELATÓRIO - PÁG. 5



RELATÓRIO - PÁG. 6



RELATÓRIO - PÁG. 7



RELATÓRIO - PÁG. 8



RELATÓRIO - PÁG. 9



RELATÓRIO - PÁG. 10



RELATÓRIO - PÁG. 11



RELATÓRIO - PÁG. 12



CÓDIGO: HS0935

AUTOR: ANA LAURA SILVA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: RUTH MARIA DA COSTA ATAIDE

TÍTULO: Sistematização das Soluções Baseadas na Natureza: desenvolvimento de banco de dados para a aplicação das infraestruturas no contexto urbano brasileiro.

Resumo

o presente artigo, sistematiza as atividades desenvolvidas no projeto de pesquisa voltado à análise de vulnerabilidades socioambientais e estratégias de adaptação às mudanças climáticas, com foco no planejamento urbano e nas SbN. . As atividades envolveram leitura e análise de fontes bibliográficas,relatórios técnicos, artigos científicos, dissertações e materiais audiovisuais, além da participação em palestras, reuniões técnicas e discussões sobre planejamento urbano, resiliência e adaptação às mudanças climáticas. Também foram elaborados produtos gráficos para representar processos ecológicos e hidrológicos e os benefícios das SbN enquanto estratégias de resiliência em situações de riscos. Os conhecimentos adquiridos também foram aplicados na disciplina Tópicos de Projeto Urbano, por meio da análise da Rua das Prímulas, em Natal/RN, onde foram identificados problemas relacionados à pavimentação, arborização, solo exposto e ausência de mobiliário urbano. A partir do diagnóstico, foi elaborada uma proposta de qualificação do espaço público, incorporando canteiros vegetados, arborização, mobiliário e áreas de permanência. A experiência evidenciou a importância da integração entre pesquisa e ensino, planejamento urbano e processos naturais para a criação de espaços mais sustentáveis, resilientes e adequados às necessidades da população.

Palavras-chave: Soluções Baseadas na Natureza; drenagem urbana; infraestrutura verde;

TITLE: BIOCLIMATIC STRATEGIES APPLIED TO URBAN PLANNING: NATURE-BASED SOLUTIONS AND SUSTAINABLE URBAN DRAINAGE

Abstract

This report presents the activities developed within a research project focused on the study of bioclimatic strategies applied to urban planning, with emphasis on Nature-Based Solutions (NBS), sustainable urban drainage, and green infrastructure. The activities included the study of technical documents, scientific articles, academic research, and audiovisual materials, as well as participation in lectures, technical meetings, and discussions addressing resilient urban planning and climate change adaptation. Graphic elements were also developed to represent ecological and hydrological processes and the benefits associated with Nature-Based Solutions. The knowledge acquired throughout the research was subsequently applied in the Urban Design Topics course through the analysis of Rua das Prímulas, in Natal, Rio Grande do Norte, Brazil. The field assessment identified problems related to inadequate paving, insufficient vegetation, exposed soil, and the lack of urban furniture. Based on this diagnosis, a proposal for the qualification of the public space was developed, incorporating planted areas, trees, urban furniture, and spaces for permanence. The experience demonstrated the importance of integrating research, education, urban planning, and natural processes in the development of more sustainable and resilient urban spaces that respond to the needs of the population.

Keywords:

Nature-Based Solutions; urban drainage; green infrastructure; urban planning; resilience.

Keywords: Nature-Based Solutions;urban drainage;green infrastructure;urban plann

Introdução

As cidades contemporâneas enfrentam desafios relacionados ao crescimento urbano, à impermeabilização do solo e aos impactos das mudanças climáticas. Entre esses problemas destacam-se o aumento das enchentes e dos alagamentos, a sobrecarga dos sistemas convencionais de drenagem, a degradação dos cursos d'água, a perda da biodiversidade e os problemas relacionados ao conforto ambiental urbano, de acordo com Marques. Diante desse cenário, torna-se necessário desenvolver estratégias capazes de integrar planejamento urbano, processos naturais e qualidade de vida.

Nesse contexto, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) apresentam-se como alternativas para incorporar processos ecológicos ao planejamento das cidades. Estratégias como biovaletas, jardins de chuva, pavimentos permeáveis, áreas vegetadas e parques lineares podem contribuir para o manejo das águas pluviais, a redução do escoamento superficial, a melhoria ambiental e a criação de espaços urbanos mais resilientes.

Este relatório apresenta as atividades desenvolvidas durante a participação no projeto de pesquisa, com foco na análise de vulnerabilidades socioambientais e nas estratégias de adaptação às mudanças climáticas, a produção de materiais gráficos e a aplicação desses conhecimentos na graduação. A experiência contribuiu para ampliar o repertório teórico e prático relacionado ao planejamento urbano sustentável e à atuação da Arquitetura e Urbanismo diante dos desafios ambientais contemporâneos.

Metodologia

O desenvolvimento das atividades ocorreu por meio de uma abordagem predominantemente qualitativa, com procedimentos que articularam estudos bibliográficos, participação em atividades formativas, discussões técnicas, produção de materiais gráficos e aplicação dos conhecimentos adquiridos em atividades acadêmicas de projeto urbano. O processo foi estruturado de modo a possibilitar a compreensão dos conceitos relacionados às SbN, à drenagem urbana sustentável, à infraestrutura verde, aos serviços ecossistêmicos e à adaptação das cidades às mudanças climáticas.

Inicialmente, foi realizada a leitura de relatórios técnicos, artigos científicos, dissertações e materiais audiovisuais disponibilizados ao longo da pesquisa. Entre os materiais estudados destacam-se o Catálogo de Soluções Baseadas na Natureza e o Guia de Indicadores para Quantificação dos Benefícios das SbN (GIZ, 2023), além de publicações relacionadas à infraestrutura verde, drenagem urbana e planejamento resiliente. As leituras permitiram compreender diferentes tipologias de SbN,seus princípios de funcionamento e possíveis benefícios ambientais, sociais e econômicos.

A pesquisa também contou com a participação em palestras e atividades formativas. Entre elas, destacou-se a palestra “Do Risco à Resiliência: Estratégias de Adaptação Climática para a Via Costeira (Natal/RN)”, ministrada pelo Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro. A atividade abordou questões relacionadas à ocupação urbana, à dinâmica costeira, à erosão, às inundações e aos eventos climáticos extremos, contribuindo para ampliar a compreensão sobre a necessidade de integração entre arquitetura, urbanismo, planejamento territorial e gestão ambiental. Também foi utilizado um podcast relacionado à drenagem urbana sustentável, infraestrutura verde e Soluções Baseadas na Natureza.

Outra etapa metodológica importante foi a realização de reuniões periódicas e discussões técnicas com a mestranda Bruna Tejo, sob orientação da coordenadora do projeto de pesquisa, responsável pelo acompanhamento direto das atividades. Esses encontros possibilitaram esclarecer dúvidas, aprofundar os conteúdos das leituras e estabelecer relações entre as referências conceituais e sua aplicação no planejamento urbano.Foram discutidos temas como drenagem sustentável, infraestrutura verde, serviços ecossistêmicos, adaptação climática e planejamento urbano resiliente, com destaque para o papel das Soluções Baseadas na Natureza na qualificação das cidades (GIZ, 2023; MARQUES et al.).

Paralelamente e de forma complementar a discussão da base conceitual,foi realizada a elaboração de produtos gráficos destinados à representação e comunicação dos

conteúdos da pesquisa. Foram produzidos ícones e composições visuais para representar processos ecológicos e hidrológicos associados às SbN, como infiltração, evapotranspiração, recarga de aquíferos, permeabilidade, retenção de sedimentos, armazenamento de água, biodiversidade, sequestro de carbono, sombreamento e redução do escoamento superficial. A produção gráfica foi utilizada como instrumento de síntese e comunicação das informações técnicas, conforme Figura 1.

Figura.1. Conjunto de ícones desenvolvidos para representar processos ecológicos e hidrológicos associados às Soluções Baseadas na Natureza.

Fonte: Elaborado pela autora, com base em Ahmad e Hassan (2025).

Figura.2.principais benefícios proporcionados pelas Soluções Baseadas na Natureza no contexto urbano.

Fonte: Elaborado pela autora, com base em Ahmad e Hassan (2025).

Por fim, os conhecimentos desenvolvidos na pesquisa foram aplicados na graduação, especialmente na disciplina Tópicos de Projeto Urbano. Foram realizadas visitas de campo em alguns territórios da Região Administrativa Norte de Natal/RN, com posterior análise dos problemas encontrados e elaboração de propostas de intervenção. A Rua das Prímulas foi uma das frações selecionadas pela turma para desenvolvimento de uma proposta, sendo identificados problemas relacionados à pavimentação/impermeabilização do solo, arborização, solo exposto e ausência de mobiliário urbano. A partir dessa análise foram desenvolvidas representações gráficas e propostas de qualificação do espaço público, permitindo relacionar diretamente o conhecimento produzido na pesquisa com uma situação urbana concreta.

Resultados e Discussões

A participação no projeto de pesquisa possibilitou ampliar o conhecimento sobre a relação entre processos naturais e organização do espaço urbano. Um dos principais resultados foi a compreensão de que o planejamento das cidades precisa considerar não apenas os elementos construídos, mas também os processos hidrológicos, ecológicos e ambientais que interferem diretamente na qualidade dos espaços urbanos,(PEREIRA et al., 2021) . A pesquisa demonstrou que a impermeabilização do solo e a alteração dos processos naturais da água estão diretamente relacionadas ao aumento do escoamento superficial e à ocorrência de problemas de drenagem.

O estudo do escoamento urbano permitiu compreender de maneira mais ampla o funcionamento do ciclo hidrológico. Em condições naturais, parte da água da chuva pode ser interceptada pela vegetação, infiltrar-se no solo, retornar à atmosfera por evapotranspiração ou escoar superficialmente até corpos d’água. O processo de urbanização modifica esse equilíbrio ao introduzir construções, ruas, calçadas e pavimentos impermeáveis. Como consequência, ocorre redução da infiltração e aumento da quantidade de água que escoa superficialmente. Quando esse volume

ultrapassa a capacidade de absorção do solo ou de condução dos sistemas de drenagem, podem ocorrer enchentes e alagamentos. Nesse sentido, as SbN aparecem como estratégias capazes de trabalhar com a própria dinâmica da água, favorecendo infiltração, retenção, armazenamento e redução do escoamento superficial.

Entre as soluções estudadas, destacam-se os jardins de chuva, as biovaletas, os pavimentos permeáveis e os parques lineares. Essas estratégias apresentam diferentes funções relacionadas ao manejo das águas pluviais no ambiente urbano, contribuindo para a redução do escoamento superficial, a infiltração da água no solo e a diminuição da sobrecarga dos sistemas convencionais de drenagem.

Os jardins de chuva são compreendidos como áreas ajardinadas destinadas a receber e armazenar temporariamente águas pluviais, favorecendo a infiltração e reduzindo o volume direcionado aos sistemas convencionais de drenagem. As biovaletas, por sua vez, apresentaram-se como dispositivos vegetados destinados a captar, conduzir e infiltrar águas pluviais, além de também contribuírem para a filtragem de poluentes e para a recarga do lençol freático.

Os pavimentos permeáveis também foram estudados como estratégia de redução do escoamento superficial. Por permitirem a passagem da água através de sua superfície, contribuem para a infiltração no solo e podem auxiliar na redução de alagamentos e na recarga dos aquíferos. Outra tipologia analisada foi a dos parques lineares, que podem ser implantadas ao longo de rios, córregos e outros cursos d'água, desempenhando simultaneamente funções ambientais, paisagísticas e de lazer. Além disso, também contribuem para a proteção dos recursos hídricos, auxiliando na retenção das águas pluviais, na preservação da biodiversidade e na redução dos riscos associados às enchentes.

A análise conjunta dessas estratégias permitiu compreender que as SbN não devem ser consideradas apenas como elementos isolados inseridos em projetos urbanos. Seu potencial está justamente na capacidade de integrar diferentes funções. Uma intervenção pode contribuir simultaneamente para o manejo da água, a melhoria da qualidade ambiental, a regulação térmica, a valorização paisagística, a biodiversidade e a criação de espaços de convivência. Essa perspectiva ampliou a compreensão sobre o papel da infraestrutura verde no planejamento urbano.

As atividades formativas contribuíram para relacionar os conteúdos teóricos com situações concretas. A palestra sobre adaptação climática para a Via Costeira, em Natal/RN, possibilitou refletir sobre os efeitos da ocupação urbana nas zonas costeiras, sujeitas a riscos ambientais, além de destacar a importância da articulação entre planejamento urbano, gestão ambiental e adaptação climática. Essa experiência reforçou a necessidade de considerar os riscos e as características ambientais do território antes da definição das intervenções urbanas.

As discussões realizadas durante as reuniões técnicas também tiveram papel relevante na consolidação dos conhecimentos. O contato com a orientação e a possibilidade de discutir dúvidas permitiram interpretar de maneira mais crítica os materiais estudados. A troca de conhecimentos ajudou a estabelecer relações entre conceitos que inicialmente poderiam ser compreendidos de forma isolada, como drenagem,

infraestrutura verde, serviços ecossistêmicos, adaptação climática e planejamento urbano resiliente.

A produção dos elementos gráficos constituiu outro resultado significativo da pesquisa. A elaboração de ícones e infográficos exigiu a compreensão dos processos que deveriam ser representados. Dessa maneira, a atividade não se limitou à representação técnica das informações, mas exigiu uma interpretação dos conteúdos científicos para que cada processo pudesse ser comunicado visualmente de maneira clara. Foram representados processos como infiltração, evapotranspiração, recarga de aquíferos, permeabilidade, retenção de sedimentos, armazenamento de água, biodiversidade, sequestro de carbono, sombreamento e redução do escoamento superficial.

A experiência demonstrou, portanto, que a representação gráfica pode funcionar como instrumento de apoio à pesquisa científica. Ao transformar informações técnicas em elementos visuais, tornou-se possível organizar conteúdos complexos e facilitar sua compreensão. Essa habilidade possui relação direta com a formação em Arquitetura e Urbanismo, área de conhecimento na qual desenhos, diagramas, mapas, esquemas e representações gráficas são importantes ferramentas fundamentais na de análise e comunicação.

A aplicação dos conhecimentos na graduação foi fundamental para verificar a relação entre pesquisa e prática projetual. A participação na disciplina Tópicos de Projeto Urbano, sugerida pela professora orientadora, permitiu utilizar os conhecimentos desenvolvidos na pesquisa em atividades aplicadas à análise e intervenção urbanística em espaços urbanos.

Durante as visitas de campo realizadas na disciplina, foram identificados problemas urbanos em diferentes ruas de Natal/RN. A Rua das Prímulas foi escolhida pelo grupo por apresentar diversos desafios relacionados à qualidade do espaço público. Entre os problemas observados estavam a ausência de pavimentação adequada, a presença de solo exposto, a deficiência de arborização e a falta de mobiliário urbano destinado à permanência dos usuários. Essas condições foram relacionadas à redução do conforto ambiental, às dificuldades de circulação dos pedestres e à menor possibilidade de utilização da rua como espaço de convivência.

Figura.3. Diagnóstico da Rua das Prímulas, em Natal/RN, realizado durante visita de campo na disciplina Tópicos de Projeto Urbano.

Figura .3.Mapa de localização

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Figura.4. Antes e Depois da intervenção na rua

Nota: A imagem evidencia a ausência de pavimentação adequada, a deficiência de arborização, a presença de solo exposto e a carência de infraestrutura voltada ao conforto e à permanência dos usuários.Fonte: Autoria própria (2026).

A partir da leitura e análise do recorte estudado, foi elaborada uma proposta de intervenção urbanística utilizando colagens e representações gráficas. O objetivo foi

transformar a rua em um espaço mais agradável, acessível e adequado à convivência entre as pessoas. A proposta inclui canteiros vegetados, árvores de pequeno porte, bancos de concreto e áreas de permanência, elementos que dialogam com os princípios das SbN ao integrar vegetação, permeabilidade e uso social do espaço. Os canteiros e árvores contribuem para a infiltração e retenção das águas pluviais, enquanto as áreas de permanência qualificam o espaço público e estimulam sua apropriação pela população.

Figura.4. Corte frontal de uma biovaleta exemplificando como ficaria na rua das papoulas.

Fonte: Bonzi (2015), apud Becegato e Tricárico (2023)

Dessa forma, a intervenção incorporou elementos relacionados à vegetação, ao conforto ambiental, à permeabilidade e à qualificação do espaço público.

A representação permitiu visualizar de forma mais clara a organização dos elementos propostos e compreender as relações entre arborização, canteiros, mobiliário urbano e áreas de permanência. A visualização das intervenções possibilitou identificar ajustes necessários e aperfeiçoar a proposta de acordo com as características observadas na área.

Nesse sentido, a aplicação dos conhecimentos da pesquisa na Rua das Prímulas demonstrou que os princípios das SbN podem ser associados à qualificação dos espaços públicos. Os princípios das SbN podem ser associados à qualificação dos espaços públicos e à melhoria da drenagem urbana. A inserção de vegetação e o aumento da permeabilidade do solo favorecem a infiltração e a retenção das águas pluviais, reduzindo o escoamento superficial e contribuindo para minimizar alagamentos e a sobrecarga do sistema convencional de drenagem (ANDRADE et al., 2025; BECEGATO; TRICÁRICO, 2023). Além disso, elementos de permanência e mobiliário estimulam o uso social do espaço. Assim, uma intervenção pontual, quando planejada de forma integrada, pode proporcionar benefícios ambientais, funcionais e sociais.

A experiência também permitiu compreender que a rua não precisa ser concebida exclusivamente como espaço destinado à circulação de veículos. Ela pode assumir funções de permanência, encontro e interação social. Essa mudança de perspectiva amplia o papel do planejamento urbano e aproxima as soluções ambientais das necessidades cotidianas da população. O relatório destaca que os conhecimentos adquiridos sobre infraestrutura verde contribuíram para compreender como a vegetação, a permeabilidade do solo e a qualificação dos espaços públicos podem colaborar para a redução do escoamento superficial, a melhoria do microclima urbano e a promoção da qualidade de vida.

Os resultados obtidos também evidenciaram a importância da integração entre diferentes áreas do conhecimento. A compreensão das SbN envolve aspectos de arquitetura, urbanismo, paisagismo, ecologia e hidrologia. Essa interdisciplinaridade foi percebida tanto nas leituras quanto nas atividades formativas e na aplicação prática. A pesquisa contribuiu, portanto, para ampliar o entendimento de que os problemas urbanos não podem ser solucionados exclusivamente por uma única perspectiva disciplinar, devendo articular diferentes campos de conhecimento, no caso em análise com a engenharia ambiental e as ciências climáticas.

Outro aspecto relevante foi o desenvolvimento da capacidade de análise crítica. O contato com artigos científicos, documentos técnicos, palestras e discussões permitiu questionar soluções convencionais e compreender a importância de estratégias adaptadas às características específicas de cada território. A experiência mostrou que a escolha de uma solução para as intervenções urbanísticas deve considerar as condições urbanas existentes, os processos naturais, as necessidades dos usuários e os benefícios esperados. Além disso, também contribuiu para o desenvolvimento de competências relacionadas à comunicação visual. A elaboração de ícones, infográficos, colagens e outras representações exigiu capacidade de síntese e organização das informações. Essa experiência demonstrou que a comunicação visual não constitui apenas uma etapa posterior ao desenvolvimento das ideias, mas pode participar ativamente do processo de análise e projeto, auxiliando na identificação de problemas e na avaliação das soluções .

De modo geral, os resultados indicam que a participação no projeto de pesquisa ultrapassou a aquisição de conhecimentos teóricos. As atividades permitiram desenvolver uma compreensão mais integrada sobre a relação entre cidade, água, vegetação, espaço público e qualidade ambiental. O conhecimento adquirido foi posteriormente utilizado em uma situação concreta de projeto urbano, demonstrando a importância da integração entre pesquisa e ensino na formação acadêmica.

A experiência também evidenciou o potencial das SbN para contribuir com cidades mais resilientes. Entretanto, o próprio processo de conhecimento da realidade e projetação mostrou que essas soluções precisam estar associadas ao planejamento e à análise do território. A simples implantação de um dispositivo não garante, isoladamente, a solução de todos os problemas urbanos. É necessário compreender a realidade concreta dos territórios identificar as necessidades e selecionar estratégias compatíveis .

Nesse sentido, a principal contribuição da pesquisa para a formação acadêmica foi a construção de uma visão mais ampla sobre o papel do arquiteto e urbanista. O profissional passa a compreender que o papel no planejamento e projeto dos espaços urbanos, excede os limites da compreensão e ação sobre a configuração física dos espaços, mas também como agente capaz de integrar aspectos ambientais, sociais e territoriais.

A participação no projeto também mostrou a importância da iniciação científica na formação universitária. As atividades de pesquisa permitiram desenvolver conhecimentos de forma articulada com o processo de ensino. .

Por fim, os resultados demonstram que as estratégias estudadas podem contribuir para transformar a maneira de pensar e projetar os espaços urbanos. A drenagem sustentável, a infraestrutura verde e as Soluções Baseadas na Natureza podem ser incorporadas ao planejamento urbano e territorial como parte de uma abordagem integrada, na qual os processos naturais passam a ser considerados componentes importantes do tecido urbano.

Conclusão

A participação no projeto de pesquisa possibilitou ampliar significativamente a compreensão sobre drenagem urbana sustentável, infraestrutura verde e Soluções Baseadas na Natureza, demonstrando a importância de integrar os processos naturais ao planejamento e ao projeto das cidades. As atividades realizadas permitiram compreender que a impermeabilização do solo e a alteração do ciclo hidrológico contribuem para o aumento do escoamento superficial e podem intensificar problemas como alagamentos e enchentes.

O estudo das biovaletas, jardins de chuva, pavimentos permeáveis e parques lineares possibilitou reconhecer diferentes formas de incorporar processos de infiltração, retenção, armazenamento e manejo das águas pluviais ao ambiente urbano. Além dos benefícios relacionados à drenagem, essas estratégias podem contribuir para a melhoria ambiental, a biodiversidade, a regulação térmica, a qualificação paisagística e a criação de espaços públicos mais adequados ao uso da população.

A aplicação dos conhecimentos da disciplina Tópicos de Projeto Urbano, especialmente na análise e intervenção da Rua das Prímulas, evidenciou a importância da pesquisa aliada à prática projetual. A experiência possibilitou transformar conceitos em estratégias de qualificação urbana, como vegetação, permeabilidade, mobiliário e áreas de permanência, contribuindo para uma visão mais crítica e sustentável da Arquitetura e Urbanismo.

Referências

ANDRADE, Liza Maria Souza de; LOUREIRO, Vânia Raquel Teles; LENOIR, Juliette Anna Fanny; OLIVEIRA, Matheus de Souza. Os jardins de chuva como Solução baseada na Natureza no projeto de urbanismo e de regularização fundiária da comunidade Dorothy Stang no Distrito Federal. 2025. Disponível em: ResearchGate. Acesso em: 12 ago. 2026.

BECEGATO, Lara Carolina; TRICÁRICO, Luciano Torres. A importância das infraestruturas verdes como tecnologias sustentáveis para contribuição da qualidade ambiental das águas pluviais urbanas. Geoambiente On-line, n. 47, p. 310-324, 2023. Disponível em: ResearchGate. Acesso em: 12 ago. 2026.

COSTA, José. Passo a passo para dimensionar um Pavimento Permeável! LinkedIn, [s. l.], 2025. Acesso em: 12 ago. 2026.

FURTADO, Jorge. Ilha das Flores. YouTube. Disponível em: YouTube. Acesso em: 8 ago. 2026.

GIZ – DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. Metodologias de quantificação: guia de indicadores para Soluções Baseadas na Natureza. Campinas: GIZ, 2023. Disponível em: portal da Prefeitura de Campinas. Acesso em: 8 ago. 2026.

PEREIRA, Maria Cristina Santana; GOBATTI, Lucas; SOARES, Mariana Corrêa; LEITE, Brenda Chaves Coelho; MARTINS, José Rodolfo Scarati. Soluções baseadas na natureza: quadro da ocupação da cidade de São Paulo por células de biorretenção. Revista LABVERDE, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 95–120, 2021. DOI: 10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.189292. Disponível em:Revista LABVERDE – artigo. Acesso em: 12 ago. 2026

MDPI. Nature-Based Solutions for Urban Stormwater Management: A Review. Water, v. 14, n. 19, 2022. Acesso em: 8 ago. 2026.

PANIC LOBSTER. Catálogo de Soluções Baseadas na Natureza. Disponível em: material digital do catálogo. Acesso em: 8 ago. 2026.

TEMPERO DRAG. Colapso da Terra. YouTube, 2023. Acesso em: 8 ago. 2026.

YOU, Kongjian. O Arquiteto da Água e a Jornada do Criador das Cidades-Esponja. YouTube. Acesso em: 8 ago. 2026.

MARQUES, Taícia Helena Negrin; RIZZI, Daniela; FERRAZ, Victor; HERZOG, Cecilia Polacow. Soluções Baseadas na Natureza: conceituação, aplicabilidade e complexidade no contexto latino-americano, casos do Brasil e Peru. Dissertação/material acadêmico utilizado durante a pesquisa.

BONZI, Ramón Stock. Corte frontal de uma biovaleta. In: BECEGATO, Lara Carolina; TRICÁRICO, Luciano Torres. A importância das infraestruturas verdes como tecnologias sustentáveis para contribuição da qualidade ambiental das águas pluviais urbanas. 2023.

AHMAD, Nadeem; HASSAN, Quamrul. Ecosystem services linked to nature-based solutions for resilient and sustainable cities in India. Frontiers in Water, v. 6, 2024. Publicado em 13 jan. 2025. DOI: 10.3389/frwa.2024.1504492

BECEGATO, Lara Carolina; TRICÁRICO, Luciano Torres. A importância das infraestruturas verdes como tecnologias sustentáveis para contribuição da qualidade ambiental das águas pluviais urbanas. Geoambiente On-line, n. 47, p. 1-16, 2023.

Anexos



Figura.1. Conjunto de ícones desenvolvidos para representar processos ecológicos e hidrológicos associados às Soluções Baseadas na Natureza.



Figura.2.principais benefícios proporcionados pelas Soluções Baseadas na Natureza no contexto urbano.Fonte: Elaborado pela autora, com base em Ahmad e Hassan (2025).



Figura .3.Mapa de localização Fonte: Elaborado pela autora (2026)



Figura.4. Antes e Depois da intervenção na rua Fonte: Autoria própria (2026).



Figura.5. Corte frontal de uma biovaleta exemplificando como ficaria na rua das papoulas. Fonte: Bonzi (2015), apud Becegato e Tricárico (2023)

CÓDIGO: HS0943

AUTOR: ANNA GABRIELLY GOMES DE QUEIROZ

COAUTOR: FERNANDA SOUZA PINHEIRO

ORIENTADOR: RUTH MARIA DA COSTA ATAIDE

TÍTULO: Espaços Livres na borda da Avenida Moema Tinoco, seus usos e suas Interfaces com a ZPA 9 em Natal/RN.

Resumo

O presente trabalho integra os produtos do projeto de pesquisa “SEL na transformação das paisagens contemporâneas: instrumentos da gestão urbana e ambiental, configuração dos espaços livres e proteção dos seus elementos naturais”, vinculando-se ao plano de trabalho “Contribuição dos espaços livres dos bairros Salinas, e frações dos bairros Potengi e Redinha para a proteção da paisagem das ZPAs 8 e 9 e seus respectivos entornos”. Dessa forma, este artigo tem por objetivo identificar e categorizar os espaços livres situados ao longo da margem direita da Avenida Moema Tinoco da Cunha Lima, na Região Administrativa Norte (RA Norte) de Natal/RN, área inserida na Zona de Proteção Ambiental 9 (ZPA 9). A partir do mapeamento, buscou-se evidenciar as formas de apropriação desses espaços e sua interface com o processo de ocupação, preservação ambiental e dinâmicas do entorno. Para isso, foram realizados o mapeamento do uso do solo, gabarito, sistema viário e parcelamento, além da identificação dos espaços livres organizados em quatro categorias: espaços livres públicos de circulação (ELPC), espaços livres públicos de permanência (ELPP), espaços livres de domínio privado (ELDP) e espaços livres privados agricultáveis (ELPA). Como resultado, a análise evidencia um sistema de espaços livres diversificado, porém desarticulado, com reduzida disponibilidade de espaços públicos e alta concentração de espaços livres de domínio privado.

Palavras-chave: Sistemas de espaços livres; ZPA 9; Avenida Moema Tinoco; Natal.

TITLE: Open Spaces along Moema Tinoco Avenue: Their Uses and Interfaces with ZPA 9 in Natal/RN.

Abstract

This paper is part of the research project “Open Space Systems (SEL) in the Transformation of Contemporary Landscapes: Urban and Environmental Management Instruments, Configuration of Open Spaces and Protection of Their Natural Elements”, and is linked to the work plan “Contribution of the open spaces of the Salinas neighborhood and portions of the Potengi and Redinha neighborhoods to the protection of the landscape of ZPAs 8 and 9 and their surroundings”. Thus, this paper aims to identify and categorize the open spaces along the right side of Avenida Moema Tinoco da Cunha Lima, in the Northern Administrative Region (RA Norte) of Natal/RN, within Environmental Protection Zone 9 (ZPA 9). Based on the mapping, the study sought to highlight the different forms of appropriation of these spaces and their relationship with the occupation process, environmental preservation, and surrounding dynamics. The mapping included land use, building height, road system, and subdivision, as well as the identification of open spaces organized into four categories: public circulation open spaces (ELPC), public permanence open spaces (ELPP), privately controlled open spaces (ELDP), and private agricultural open spaces (ELPA). The analysis reveals a diverse but poorly connected open space system, with limited public spaces and a high concentration of privately controlled open spaces.

Keywords: Open space systems; ZPA 9; Moema Tinoco Avenue; Natal.

Introdução

Os espaços livres são áreas não edificadas, públicas ou privadas, possuindo funções sociais, ambientais e urbanísticas ao contribuir para a permanência e circulação da população, proteção e conservação dos recursos naturais e na estruturação da paisagem urbana (Magnoli, 2006).

Em Natal, capital do Rio Grande do Norte, os atributos biofísicos favorecem a expressiva presença de espaços naturais, grande parte deles inseridos nas Zonas de Proteção Ambiental (ZPA), delimitadas no macrozoneamento do Plano Diretor do município (Natal, 2022). As ZPAs estão distribuídas em dez frações nas quatro Regiões Administrativas (RA), configurando-se como espaços protegidos em razão das especificidades dos seus ecossistemas, aspectos culturais, históricos, arqueológicos e paisagísticos (Natal, 2022).

Dentre as ZPAs, destaca-se a ZPA 9 - Ecossistema de dunas fixas e lagoas e dunas ao longo do rio Doce, localizada na RA Norte, envolvendo frações dosbairros de Lagoa Azul, Redinha e Pajuçara. A referida ZPA foi submetida a alterações normativas a partir do Plano Diretor de Natal (PDN 2022), osquais ampliaram o potencial construtivo, que incidem diretamente sobre os seus espaços livres inseridos na subzona de uso restrito (SUR)[1].

Este trabalho busca, portanto, identificar e categorizar os espaços livres no entorno da avenida Moema Tinoco e a relação destes com o tecido urbano. O trabalho está estruturado em três partes: metodologia, resultado e discussões, e conclusões além da introdução.

Metodologia

A pesquisa utiliza uma base teórica-metodológica desenvolvida pela Rede de Pesquisa Quadro de Paisagismo no Brasil - Sistemas de Espaços Livres (QuaPá-SEL), dialogando com os estudos sobre a produção, apropriação e padrões dos espaços livres. Neste trabalho, recorremos a Eugênio Queiroga (2009), para a compreensão conceitual dos espaços livres e sistemas de espaços livres; contribuições de Paulo Nobre, Heitor Silva, Ruth Ataíde et al. (2018) e o trabalho final de graduação de Fernanda Pinheiro (2025) para a leitura dos Espaços Livres em Natal. Para a produção cartográfica, foram utilizadas asbases fornecidas pelo Plano Diretor de Natal (Natal, 2022) e pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB, 2022), que fundamentaram a análise espacial, incluindo o processo de ocupação do solo e a estruturação do sistema viário comdestaque para os espaços livres das frações dos bairros de Lagoa Azul, Pajuçara e Redinha, os quais integram a ZPA 9 e margeiam a Avenida Moema Tinoco.

Ademais, foi realizada a análise do subzoneamento da ZPA 09 e seus parâmetros urbanísticos, tomando como referência principal a Lei Unificada das ZPAs estabelecida pela lei complementar n°261 de 3 de Julho de 2025 (Natal, 2025).

Para além dos estudos sobre a ZPA 9 e dos conceitos de espaço livre, foi realizada uma visita de campo para análise da Avenida Moema Tinoco e seu entorno imediato, observando a presença dos espaços livres, as apropriações e funções, a paisagem urbana, e as relações entre o ambiente natural e o construído. O reconhecimento de campo resultou em uma base de dados e registros fotográficos atualizados com informações adicionais como pontos de alagamento, novos usos, fluxos de circulação e formas de apropriação dos espaços livres ao longo da Avenida Moema Tinoco e proximidades. Dessa maneira, todas as informações agrupadas serviram como base para a produção dos mapas por meio do QGIS (Quantum GIS) que serão analisados no presente trabalho.

Nesse sentido, os procedimentos metodológicos ao longo desta pesquisa buscaram discutir acerca dos espaços livres e a paisagem dos bairros Lagoa Azul, Pajuçara e Redinha. A partir dos dados e das análises realizadas, discute-se sobre as diretrizes e critérios funcionais para a articulação dos espaços livres do recorte estudado.

Resultados e Discussões

A leitura urbana do recorte estudado permitiu identificar os atributos ambientais, paisagísticos, socioespaciais e funcionais que caracterizam o universo estudado, evidenciando as relações e os conflitos normativos nele presentes. Nesse sentido, os mapas produzidos a partir da base dedados fornecida pela SEMURB, associados aos dados obtidos por meio das imagens de satélite, imagens street view e durante a visita de campo, complementam a leitura espacial e subsidiaram a produção cartográfica, possibilitando identificar o uso do solo, gabarito, espaços livres, sistema viário e as áreas de agricultura urbana presentes no entorno da Avenida Moema Tinoco.

Figura 01: Natal e suas ZPA

Fonte: A primeira autora, 2026

Figura 02: Recorte de estudo

Fonte: A primeira autora, 2026

Quanto à configuração do tecido urbano, ressalta-se que, em decorrência do projeto de reestruturação, duplicação e prolongamento da Avenida Moema Tinoco, com extensão aproximada de 8 km e obras iniciadas no ano de 2013, diversos trechos do tecido edificado situados na margem direita da referida avenida, no sentido da BR-101, foram objeto de demolição para viabilizar a duplicação desse eixo de conexão viária, que constitui um dos principais acessos entre a capital e os municípios da região metropolitana situados ao norte.

Com base na tese de Camila Furukava (2018),o redesenho da Avenida Moema Tinoco desconsiderou a escala humana e priorizou quase que exclusivamente a escala do automóvel, desconectando a população da paisagem da ZPA 9. Segundo Furukava, foi uma promessa para a conexão da região que culminou em desmontes físicos, assoreamentos no Rio Doce e desapropriações em massa de diversas famílias que viviam nas margens da avenida antes da reforma.

Ao analisar o tecido urbano, nota-se que o parcelamento desse recorte territorial é levemente irregular, com quadras retilíneas longas e em alguns setores há a presença de grandes vazios nos lotes lindeiros à avenida, resquícios das desapropriações ocorridas devido às reformas realizadas na avenida (Figura 03). De modo geral, identifica-se dois tipos de parcelamentos: um parcelamento linear, situado próximo à Avenida Dr. João Medeiros Filho e originado de loteamentos; e outro de caráter espontâneo, decorrente do avanço das ocupações às margens da Avenida Moema Tinoco.

O traçado é composto por vias retilíneas estreitas e longas que se articulam-se a uma via principal levemente sinuosa. As vias menores com largura média de 5 metros são caracterizadas como vias locais, possuem entre uma a duas faixas de rolamento, cujo recobrimento predominante é de solo, possuindo ou não calçadas. A via principal, por sua vez, possui quatro faixas de rolamento e largura média de 23 metros, cujo recobrimento é feito em asfalto. Em determinados trechos, resultantes da reforma de reestruturação, verifica-se a presença de um

extenso canteiro central, ao passo que, em outros trechos, próximo à Rodovia Mário Covas, a via apresenta apenas duas faixas de rolamento, acompanhadas de calçadas estreitas. Sua extensão é considerável, percorrendo a ZPA 9 de norte a sul com operação de veículos nos dois sentidos. Nesse sentido, a configuração do traçado evidencia uma coexistência entre os espaços livres de ocupação e espaços livres vegetados nas proximidades da Avenida Moema Tinoco (Figura 03).

Figura 03: Figura fundo - parcelamento das quadras

Fonte: A primeira autora, 2026

No que concerne ao tamanho dos lotes, embora não tenha sido possível confirmar o tamanho médio predominante por meio da cartografia, foi possível inferir, a partir das imagens de satélites, que são lotes estreitos e longos, o que permite acomodar os usos voltados para a agricultura no recuo posterior.

Quanto aos padrões de ocupação a partir do o uso do solo, observa-se a predominância das atividades residenciais seguida do uso comercial nas margens da avenida, com destaque para os comércios em pequena escala, o que demonstra o papel da avenida como eixo de centralidade, circulação e conexão. Ademais, o gabarito é majoritariamente entre 1 e 2 pavimentos, demonstrando baixo adensamento vertical.

De acordo com Furukava (2018), com a reestruturação da avenida, os lotes lindeiros desta passaram a ser mais valorizados pelo mercado imobiliário, como constatado na visita local onde alguns terrenos agora passaram a abrigar empreendimentos comerciais de médio e grande porte. Esse processo desencadeou a atual configuração desse espaço, caracterizada pela presença de diversos espaços livres privados submetidos à pressão por ocupação pelo mercado imobiliário, registros observados no aparecimento de novos pontos comerciais e ampliação de outros, sendo ainda mais valorizados pela dinâmica do mercado característico da região, conforme analisadopor Furukava (2018).

Figura 04: Uso do solo

Fonte: A primeira autora, 2026

Figura 05: Gabarito

Fonte: A primeira autora, 2026

Os espaços livres foram categorizados a partir do percurso metodológico proposto por Fernanda Pinheiro (2025), que identifica os espaços livres a partir de categorias em três categorias: as vias, compreendidas como espaços livres públicos de circulação (ELPC); as praças, canteiros, vazios urbanos, quadras e demais equipamentos urbanos nos quais se identifique alguma apropriação pela população, seja para fins de comércio, apreciação, lazer ou prática esportiva, compreendidos como espaços livres públicos de permanência (ELPP); e os espaços livres de domínio privado (ELDP), composto por terrenos privados livre

de ocupação. A partir das especificidades do recorte de estudo aqui apresentado, os espaços livres foram identificados mediante complementação do percurso metodológico anteriormente exposto, mantendo-se a identificação dos ELPC, ELDP e dos ELPP e acrescentando-se uma nova categoria, correspondendo aos espaços livres privados agricultáveis (ELPA).

Dos 362 espaços livres mapeados, 113 são ELPC; 248 são espaços livres privados, desses, 64 foram categorizados como ELPA e apenas 1, dos 362 espaços, é um ELPP, com quadra poliesportiva voltada ao lazer e a recreação e equipamentos de academia para terceira idade voltado ao bem estar. Dessa maneira, observa-se que os dados evidenciam a predominância dos espaços de domínio privado que não possibilitam a apropriação coletiva[2].

Os ELPC do recorte foram mapeados, classificados e agrupados em famílias e tipos observando os seguintes critérios: a partir do recobrimento, existência ou não de passeios, largura da via e permeabilidade com os lotes lindeiros, conforme proposto por Pinheiro (2025). A partir disso, foram identificadas 113 vias organizadas em 20famílias que correspondem aos tipos de A a T, destacando-se a prevalência da família 5 cujas características combinam recobrimento do solo, a inexistência de passeio e permeabilidade com os lotes lindeiros ruim, respectivamente.

A Avenida Moema Tinoco foi categorizada como uma via pertencente à Família 8, enquanto que as demais vias a ela conectadas são, em sua maioria, classificadas nas Famílias 5, 3 e 15. Tais vias apresentam como características comuns o recobrimento do leito carroçável natural, a reduzida presença de passeios e, quando existentes, são estreitos, com largura menor que 2 metros, e por fim, uma baixa ou ausência de permeabilidade com os lotes lindeiros.

Por outro lado, os ELPC possuem características que evidenciam a desconsideração da escala humana no planejamento urbano, o qual privilegia a circulação de veículos em detrimento da circulação de pedestres. O fato é analisado a partir da constatação de que, das 113 vias analisadas, cerca de 76 não possuem passeio (cerca de 67% das vias do sistema) (Figura 07).

Figura 06: Tipos de espaços livres públicos de circulação (ELPC)

Fonte: A primeira autora, 2026

Figura 07: Tabela de famílias dos ELPCs

Fonte: A primeira autora, 2026

No que se refere aos ELPP e aos ELPA, estes foram identificados com base nas imagens de satélite e no google street view, buscando reconhecer a presença de equipamentos urbanos e espaços livres de construção voltados ao lazer, recreação, esportes e contemplação, bem como identificar as áreas de agricultura situadas nos espaços livres privados.

Observando a figura 08, é possível constatar que há uma distribuição desigual entre os espaços livres públicos e privados no interior da ZPA 9 e principalmente ao longo da margem direita Avenida Moema Tinoco, onde são registrados apenas espaços livres de domínio privado que não possuem nenhum tipo de apropriação pela população.

Figura 08: Espaços Livres Públicos e Privados

Fonte: Autoria própria, 2026

A agricultura é uma atividade bastante presente no recorte analisado devido sua proximidade com lagoas naturais e a grande disponibilidade de áreas livres capazes de acomodar tal atividade. No âmbito da classificação dos espaços livres, as áreas agrícolas foram classificadas como espaços livres privados, visto que estão associadas à porção posterior dos lotes cultivados de dominialidade privada que não permitem o acesso comum.

A substituição dos espaços cultivados por espaços edificados acontece há anos na ZPA 9, tendo o inícioentre os anos de 1988 e 2004, devido à abertura do mercado imobiliário e da pressão demográfica (Furukava, 2018). Atualmente, ao longo da Avenida Moema Tinoco, as lavouras foram se acomodando ao fundo dos lotes, demonstrando um conflito direto entre a nova dinâmica rodoviária e as produções tradicionais do recorte.

Apesar da ausência de acesso público, as áreas de agricultura urbana desempenham papel relevante no abastecimento alimentar e na subsistência das famílias, configurando-se, também, como elemento estruturante da paisagem. Ainda que apresentem uma morfologia distinta em relação às áreas de cobertura vegetal mais densas existentes no perímetro da ZPA, os espaços de agricultura reforçam a importância de sua proteção.

Figura 09: Espaços ocupados pela atividade agrícola

Fonte: Autoria própria, 2026

Como parte da pesquisa, realizou-se uma visita de campo, realizada em junho de 2026, com o objetivo de reconhecer os espaços livres e sua interface com a ZPA 9. Nessa visita, percorrida nas Avenidas Dr. João Medeiros Filho e Avenida Moema Tinoco, foram definidas cinco paradas em locais estratégicos, selecionadas com o intuito de evidenciar os elementos previamente identificados na leitura espacial, tais como os espaços livres às margens da Avenida Moema Tinoco, os espaços livres de permanência e as áreas agricultáveis. A partir da visita in loco, foi possível identificar a topografia, a relação das atividades agrícolas com o perímetro urbano, áreas alagáveis, entre outros atributos urbanísticos e socioambientais. As análises realizadas em cada ponto visitado serão apresentadas a seguir.

Figura 10: Paradas da visita de campo

Fonte: Autoria própria, 2026

A primeira parada, identificada na Figura 10 pelo número 1, teve como objeto de análise a observação de um único espaço livre público presente no perímetro da ZPA, que corresponde a um equipamento urbano esportivo composto por uma quadra, mobiliários de calistenia e academia da terceira idade. De modo preliminar, é possível inferir que, essa quadra com aproximadamente 3.147m² de área, é o único espaço livre público de permanência e lazer na extensão de toda a ZPA que por sua vez, possui cerca de 734,9 hectares. Essa relação demonstra a oferta reduzida de áreas destinadas à permanência, ao lazer e à apropriação da população.

Figura 11: Parada 1 - Espaço Livre Público

Fonte: Acervo pessoal, 2026

A segunda parada, teve como objeto de observação, as transformações recentes registradas em espaços livres privados lindeiros à Avenida Moema Tinoco, os quais se encontram em processo de ocupação de novos empreendimentos. A exemplo disto, o terreno destacado na imagem fotografada durante a visita (Figura 12), que já havia sido previamente mapeado como espaço livre privado e que, durante a visita no local, foi constatado que estava sendo construído um edifício. Essa constatação sustenta, ainda que de forma preliminar, a hipótese de que o mercado imobiliário demonstra interesse na ocupação da franja da Avenida Moema Tinoco, induzindo, assim, a consolidação de usos futuros caracterizados por maior densidade ocupacional.

Figura 12: Parada 2 - Transformações em espaços livres

Fonte: Acervo pessoal, 2026

A terceira parada, permitiu visualizar a existência da agricultura e a relação desta com o meio urbano. Assim, notou-se que esta atividade atende a demandas de subsistência e abastece os pequenos mercados ao longo da Avenida Moema Tinoco, como podemos observar na imagem da parada 5 (Figura 14), onde o grupo de pesquisa pôde visitar um mercado local com diversos legumes, frutas e verduras às margens da avenida[3].

Figura 13: Parada 3 - Atividade agrícola

Fonte: Acervo pessoal, 2026

Figura 14: Parada 5 - Mercado de pequena escala

Fonte: Acervo pessoal, 2026

No ponto 4, seguimos pela Rodovia Mário Covas com o intuito de observar a dimensão do corpo d'água Lagoa Azul, situada na ZPA 9, demonstrando parte estruturante da paisagem. Sua capacidade evidencia a importância dos recursos hídricos para as atividades agrícolas e para as comunidades locais.

Figura 15: Parada 4 - A lagoa

Fonte: Acervo pessoal, 2026

A parada 5, por sua vez, contribuiu para evidenciar que os espaços livres da ZPA 9, localizados às margens da Avenida Moema Tinoco, possuem usos produtivos para além da agricultura, como a criação de gado. A presença dessa atividade evidencia os múltiplos usos dos espaços livres privados dentro do recorte, estabelecendo uma ligação com atividades, em sua grande maioria, voltadas à práticas produtivas.

Figura 16: Parada 5 - Criação de gado

Fonte: Acervo pessoal, 2026

A agricultura instalada nos fundos dos lotes foi observada na parada 6, onde foi possível constatar que a produção agrícola na região permanece incorporada no tecido urbano mesmo que ocupe as porções posteriores dos lotes.

Figura 17: Parada 6 - Agricultura no fundo de um lote

Fonte: Acervo pessoal, 2026

De modo geral, a análise evidencia um sistema de espaços livres desarticulado, embora diversificados, sendo que a referida localidade ainda apresenta reduzida disponibilidade de espaços livres públicos em comparação aos espaços livres privados, o que demonstra carência de áreas destinadas ao uso coletivo, permanência e lazer da população. Ademais, a leitura conjunta da forma urbana, do sistema viário e dos usos demonstrou uma coexistência entre as atividades produtivas tradicionais e urbanização, mas que convive diariamente com as pressões do setor imobiliário.

Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo identificar e categorizar os espaços livres situados ao longo da Avenida Moema Tinoco, área inserida na ZPA 9, buscando evidenciar as formas de apropriação desses espaços e agrupá-los em categorias por tipos.

A partir da análise espacial, os resultados demonstram que os espaços livres apresentam-se de forma diversificada, incluindo espaços livres públicos e privados, distribuídos em diferentes categorias: espaços livres públicos de circulação, espaços livres públicos voltados ao lazer e à permanência, espaços livres privados de uso agrícola e espaços livres associados a recursos hídricos, havendo predominância dos espaços livres privados e apenas um espaço livre público, o que demonstra uma reduzida oferta de espaços qualificados voltados ao lazer e a permanência na ZPA 9.

As transformações dos parâmetros normativos e na forma urbana do recorte estudado modificaram o tecido urbano e contribuíram para desapropriações seguidas de demolições de diversas edificações lindeiras à avenida. Esse processo alterou a configuração dos lotes e das quadras mais próximas à avenida Moema Tinoco, provocando grandes vazios urbanos. As alterações podem ser observadas nas áreas não edificadas nas margens da avenida, onde ocorreram as intervenções. Em paralelo, observou-se uma valorização do entorno da avenida após a reforma, culminando na expansão das atividades comerciais tanto nos espaços livres resultantes das desapropriações quanto naqueles já existentes antes da intervenção, constatada pela sobreposição da leitura espacial com a visita de campo. Além disso, a agricultura permanece resistindo pela manutenção do espaço, adaptando-se ao processo de expansão urbana e à pressão exercida pela flexibilização normativa, instalando-se nos fundos dos lotes privados.

No que se refere à proteção ambiental da ZPA 9, constata-se a coexistência de processos de transformação da paisagem, expansão urbana e valorização imobiliária. A legislação vigente auxilia na proteção da área mas não impede diretamente as pressões que cercam os espaços livres privados, visto que estes estão se tornando cada vez mais almejados pelo mercado.

Verifica-se ainda que, as atividades agrícolas instaladas nos fundos dos lotes, configuram um problema, sobretudo no que tange ao acesso e escoamento da produção, em razão da distância entre essas atividades e a Avenida Moema Tinoco. Os conflitos decorrentes dessa configuração, somados à valorização imobiliária e a necessidade de conservação ambiental, evidenciam a importância de uma compreensão integrada desses conflitos. Dessa forma, o presente trabalho justifica-se pela importância de se conhecer os espaços livres, de modo que, em propostas futuras, seja possível articular o sistema de espaços livres de modo que fortaleça a agricultura familiar, reforce a proteção ambiental, qualifique e amplie a oferta de espaços públicos.

Referências

[1]As ZPA subdividem-se em três níveis de proteção, conforme o grau de fragilidade ambiental: a subzona de preservação, a subzona de conservação, e a subzona de uso restrito. De acordo com o PDN 2022, elas são definidas como:

“I – Subzona de Preservação, que compreende: a) as Áreas de Preservação Permanente – APPs, nos termos da Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012, e alterações posteriores, e demais normas protetivas correlatas; b) as Unidades de

Conservação da Natureza de proteção integral, Lei Federal nº 9.985, de 8de julho de 2000, e alterações posteriores; c) florestas e formas de vegetação primárias, nos termos da Lei Federal nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006, e alterações posteriores; d) áreas necessárias para proteção e recarga dos recursos hídricos.

II – Subzona de Conservação, que compreende: a)área de transição entre a Subzona de Preservação e a Subzona de Uso Restrito definida com o propósito de minimizar os impactos negativos sobre a Subzona de Preservação; b) área de Mata Atlântica remanescente da

ocupação urbana prevista nos Arts. 30 e 31 da Lei 11.428/2007 (Lei da Mata Atlântica), com ocorrência de serviços ecossistêmicos de provisão, regulação, cultural ou de suporte, especialmente aqueles relacionados à captura de carbono, manutenção do ciclo hídrico e proteção da biodiversidade e cênica.

III - Subzona de Uso Restrito, compreende a área que se encontra em processo de ocupação, para a qual o Município estabelece prescrições urbanísticas no sentido de orientar e minimizar as alterações no meio ambiente em consonância com o princípio do desenvolvimento sustentável" (Natal, 2022, art. 19).

[2]Não foi possível obter acesso aos dados relativos à dominialidade dos imóveis, ou seja, se a sua condição fundiária é pública ou privada. Não obstante, é possível inferir, com as devidas ressalvas, que os espaços livres identificados são, em sua maioria, privados, uma vez que se constatou, na maior parte dos trechos analisados e visitados in loco, a presença de algum tipo de barreira física, como cercas, muros ou outros elementos que impossibilita o acesso direto ao lote. Cabe ressaltar, contudo, que a análise da existência dessas barreiras apresenta limitações, uma vez que os imóveis de domínio público podem apresentar restrições físicas, assim como, os espaços de domínio privado não.

[3]A comunidade do Gramorezinho, região visitada no ponto 3 do percurso, mantém produção agrícola periurbana tradicional há cerca de 50 anos. Inicialmente restrita a poucas variedades (cebolinha, alface e coentro), a produção foi diversificada e convertida ao cultivo orgânico a partir do Projeto Amigo Verde no ano de 2012, idealizado pelo Ministério Público do RN e passando a incluir hortaliças, legumes, ervas, frutas e flores. A comercialização ocorre de forma descentralizada e majoritariamente direta ao consumidor, reduzindo a dependência de atravessadores, por meio de feiras orgânicas em órgãos públicos, condomínios e shoppings, feiras livres e de agricultura familiar em diversos bairros, centrais de abastecimento (CECAFES e CEASA-RN), e ainda na venda local ou entregas diretas a restaurantes e supermercados (Medeiros, 2023).

CAPISTRANO, Luciano F. D. et al.**Memória Minha Comunidade: Lagoa Azul.** Natal: Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB), 2013.

NATAL (Município). **Lei Complementar nº 261, de 3 de julho de 2025.** Dispõe sobre a unificação das prescrições urbanísticas e ambientais das Zonas de Proteção Ambiental do Município de Natal - RN. Natal, RN, 2025. Disponível em: <Sistema de Apoio ao Processo Legislativo – Câmara Municipal de Natal>. Acesso em: 5 Jun. 2026.

FURUKAVA, Camila. **Zonas de proteção ambiental e projetos rodoviários: pressões e transformações entre a Zona de Proteção Ambiental 9 e o projeto rodoviário da Av. Moema Tinoco da Cunha Lima, Natal/RN.** 2018. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

GOOGLE. **Google Earth.** [S. l.]: Google, [s. d.]. Disponível em: <https://earth.google.com/>.

GOOGLE. **Google Street View.** [S. l.]: Google, [s. d.]. Disponível em: <https://www.google.com/streetview/>.

MACEDO, Silvio Soares; CAMPOS, Ana Cecília Arruda; QUEIROGA, Eugênio Fernandes (org.). **Os sistemas de espaços livres e a constituição da esfera pública contemporânea no Brasil.** São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2018.

MACEDO, Silvio Soares; CUSTÓDIO, Vanderli; QUEIROGA, Eugênio Fernandes; CAMPOS, Ana Cecília de Arruda; GALENDER, Fany (org.). **Os sistemas de espaços livres e a constituição da esfera pública contemporânea no Brasil.** São Paulo: EDUSP, 2018.

MAGNOLI, Miranda Martinelli. **Espaço livre - objeto de trabalho.** Paisagem e Ambiente, São Paulo, Brasil, n. 21, p. 175–197, 2006. DOI: 10.11606/issn.2359-5361.v0i21p175-197. Disponível em: https://revistas.usp.br/paam/article/view/40249. Acesso em: 26 ago. 2026.

MEDEIROS, Camila Bezerra Nobre de. **Campo e cidade em três tempos: descontinuidades, permanências e possibilidades para a agricultura no entorno da avenida Moema Tinoco em Natal/RN.** 2023. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

NATAL. **Lei Complementar nº 208, de 07 de março de 2022.** Natal: Diário Oficial do Município, 2022.

NATAL (RN). Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB). **Natal em Dados.** Disponível em: <https://www.natal.rn.gov.br/semurb/sistemas-de-info>. Acesso em: 6 Mai. 2026.

NOBRE, Paulo José Lisboa; SILVA, Heitor de Andrade; ATAÍDE, Ruth Maria da Costa; BENTES SOBRINHA, Maria Dulce Picanço; ALVES, Elisânia Magalhães; MAMERI, Silvana Ferracciú. **Sistema de espaços livres em Natal-RN: zonas de proteção ambiental como elementos estruturantes.** In: CAMPOS, Ana Cecília Arruda; QUEIROGA, Eugênio Fernandes; GALENDER, Fany; DEGREAS, Helena Napoleon; AKAMINE, Rogério; MACEDO, Silvio Soares; CUSTÓDIO, Vanderli (org.). **Quadro dos sistemas de espaços livres nas cidades brasileiras.** São Paulo: FAUUSP, 2012. p. 117-134.

PINHEIRO, Fernanda Souza. **Reimaginar a paisagem em dissolução: articulação de um sistema de espaços livres no entorno da ZPA 8.** 2025. Trabalho Final de Graduação (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.

QUEIROGA, Eugênio Fernandes et al. **Espaços livres e espacialidades da esfera de vida pública: uma proposição conceitual para o estudo de sistemas de espaços livres urbanos no país.** Paisagem e Ambiente: Ensaios, São Paulo, n. 26, p. 119–138, 2009.

SANDEVILLE JÚNIOR, Euler. **Paisagem.** Paisagem e Ambiente: Ensaios, São Paulo, n. 20, p. 47–59, 2005. DOI: 10.11606/issn.2359-5361.v0i20p47-59.

Anexos



Figura 01: Natal e suas ZPA



Figura 02: Recorte de estudo



Figura 03: Figura fundo - parcelamento das quadras



Figura 04: Uso do solo



Figura 05: Gabarito



Figura 06: Tipos de espaços livres públicos de circulação (ELPC)



Figura 07: Tabela de famílias dos ELPCs



Figura 08: Espaços Livres Públicos e Privados



Figura 09: Espaços ocupados pela atividade agrícola



Figura 10: Paradas da visita de campo



Figura 11: Parada 1 - Espaço Livre Público



Figura 12: Parada 2 - Transformações em espaços livres



Figura 13: Parada 3 - Atividade agrícola



Figura 14: Parada 5 - Mercado de pequena escala



Figura 15: Parada 4 - A lagoa



Figura 16: Parada 5 - Criação de gado



Figura 17: Parada 6 - Agricultura no fundo de um lote

CÓDIGO: HS0952

AUTOR: FERNANDA SOUZA PINHEIRO

ORIENTADOR: RUTH MARIA DA COSTA ATAIDE

TÍTULO: Parques Urbanos em Natal: uma análise a partir do mapeamento, classificação e caracterização da tipologia

Resumo

Os espaços livres públicos constituem elementos fundamentais da estrutura urbana, exercendo funções ambientais, sociais e paisagísticas essenciais à qualidade de vida nas cidades. Dentre eles, os parques que destacam-se por articular, em um mesmo espaço, a conservação de recursos naturais e a promoção do lazer e da recreação. Portanto, o presente artigo tem como objetivo mapear, classificar e caracterizar tipologicamente os parques do município de Natal/RN, selecionados segundo três critérios: a institucionalização, a escala de inserção no tecido urbano, e a gestão. Foram selecionados na macroescala, o Parque das Dunas e o Parque da Cidade Dom Nivaldo Monte, e na microescala, o Parque Cidade da Criança e o Parque Ecológico de Capim Macio. Quanto aos resultados, estes evidenciam as características dos parques quanto à origem institucional, à natureza da proteção legal, ambiental ou histórico-cultural, e ao modelo de gestão, estadual, municipal ou compartilhada.

Palavras-chave: Espaços Livres; Parques; Natal/RN; Mapeamento e classificação.

TITLE: Urban Parks in Natal: An Analysis Based on the Mapping, Classification, and Characterization of Typology

Abstract

Public open spaces constitute fundamental elements of urban structure, performing environmental, social, and landscape functions that are essential to quality of life in cities. Among them, parks stand

out for combining, within the same space, the conservation of natural resources and the promotion of leisure and recreation. Therefore, this article aims to map, classify, and typologically characterize the parks of the municipality of Natal/RN, selected according to three criteria: institutionalization, the scale of insertion into the urban fabric, and management. At the macro scale, Parque das Dunas and Parque da Cidade Dom Nivaldo Monte were selected, while at the micro scale, Parque Cidade da Criança and Parque Ecológico de Capim Macio were selected. Regarding the results, these highlight the parks' characteristics in terms of institutional origin, the nature of legal, environmental, or historical-cultural protection, and the management model—whether state, municipal, or shared.

Keywords: Open Spaces; Parks; Natal/RN; Mapping and Classification.

Introdução

Os parques urbanos contemporâneos brasileiros constituem uma tipologia de espaço livre que articula, em um mesmo conceito, a dimensão do lazer e da recreação e a do parque natural ou unidade de conservação voltada à conservação ambiental (Sakata, 2018). Embora o conceito contemple duas escalas sob uma mesma perspectiva, alguns parques resguardam características únicas em razão das suas especificidades, inserção no tecido urbano, das formas de apropriação pela população ou ainda pelo modelo de gestão.

Em Natal, capital do Rio Grande do Norte, o Sistema de Espaços Livres (SEL), é composto pelos parques e outras frações territoriais de diferentes escalas e funções destacando-se, na macroescala, as faixas de praia e as grandes frações territoriais instituídas pelo Plano Diretor de Natal (PDN, 2022) como Zona de Proteção Ambiental (ZPA), havendo, em alguns casos, a sobreposição dessas frações com o perímetro de alguns parques. E na microescala, concentrando-se as praças, pequenos parques e outros espaços livres distribuídos de forma desigual no tecido urbano da cidade (Ataíde, et al., 2026).

Diante disso, evidencia-se a relevância em identificar, mapear e categorizar os parques de Natal, de modo a subsidiar reflexões sobre seu papel na estrutura urbana e ambiental. Assim, este trabalho estrutura-se em três partes: metodologia, resultados e discussão (subdividida em revisão conceitual, os parques no Plano Diretor de Natal e a análise dos quatro parques selecionados) e conclusões.

Metodologia

O artigo faz parte dos produtos da pesquisa "SEL na transformação das paisagens contemporâneas: instrumentos da gestão urbana e ambiental, configuração dos espaços livres e proteção dos seus elementos naturais"[1], vinculando-se ao plano de trabalho "Mapeamento, classificação e caracterização tipológica dos espaços livres públicos com ênfase nos parques urbanos do município de Natal/RN"[2]. Esta é uma pesquisa de natureza qualitativa, com caráter exploratório e descritivo cujo objetivo é identificar, mapear, classificar e categorizar os parques urbanos que compõem o Sistema de Espaços Livres da cidade (SEL). Dessa forma, o percurso metodológico para se alcançar tais objetivos foi organizado em quatro etapas, a saber: revisão teórico conceitual, busca e análise documental, coleta de informações junto às instituições gestoras e mapeamento dos parques. A revisão teórico-conceitual fundamenta-se nos estudos de Silvio Macedo e Francine Sakata (2010) e Francine Sakata (2018), que discutem o conceito de parque urbano e suas categorias tipológicas. A segunda etapa consistiu no levantamento documental, em sites institucionais, notícias e manchetes de jornais, com o objetivo de identificar os parques existentes em Natal. A partir desse levantamento, foram selecionados documentos referentes a quatro parques instituídos, dois sob a gestão municipal e dois sob a gestão estadual[3]. Em seguida, buscou-se junto às instituições responsáveis e ainda por meio de pesquisa bibliográfica a coleta de informações complementares sobre esses espaços. O roteiro de análise seguiu a metodologia desenvolvida pelo grupo QUAPÁ-SEL[4], estruturada

em cinco dimensões de investigação: acessibilidade e inserção urbana, aspectos ambientais, usos e atividades, gestão e manutenção, cada uma delas avaliada a partir de critérios quantitativos e qualitativos. Complementarmente, a metodologia inclui um conjunto de questões abertas voltadas à compreensão de aspectos históricos, institucionais e político-administrativos relacionados à criação e gestão de cada parque. Essa etapa envolveu ainda visitas de campo a cada um dos parques, com o objetivo de verificar in loco suas instalações e equipamentos, informações que posteriormente subsidiaram o mapeamento.

Por fim, a última etapa consistiu na compilação desses dados em um mapeamento cartográfico georreferenciado, elaborado no software QGIS, com o objetivo de espacializar os equipamentos existentes nos parques.

[1] Como resultado dessa mesma pesquisa, foi publicado, em agosto de 2026, o capítulo de livro intitulado "Natal", integrante da obra "Parques Urbanos no Brasil 2", fruto da referida pesquisa, no qual foram apresentados os quatro parques selecionados e trabalhados no presente artigo (Ataíde et al., 2026).

[2] A autora participou do referido projeto de pesquisa por meio de iniciação científica durante três anos consecutivos, tendo o presente plano de trabalho sido desenvolvido entre os meses de setembro de 2025 e janeiro de 2026.

[3] Os parques foram selecionados segundo três critérios: a institucionalização efetiva, ou seja, a existência de lei ou decreto que o reconhecesse como tal; segundo à escala de inserção no tecido urbano, estabelecida em macro e micro; terceiro com relação à gestão, se estadual, municipal ou outra.

[4] Quadro do Paisagismo no Brasil – Sistemas de Espaços Livres - QUAPÁ-SEL, é uma rede de pesquisa que estuda a paisagem urbana brasileira, especialmente os espaços livres públicos e privados. A rede foi fundada na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - FAUUSP pelo professor Silvio Macedo.

Resultados e Discussões

Historicamente, o conceito de parque urbano no Brasil passou por diversas modificações e transformações teóricas. Em um primeiro momento, no início do século XX, o parque era compreendido como todo o espaço de uso público destinado à recreação e à apropriação social, tendo como principal característica, o isolamento em relação ao tecido urbano da cidade. No entanto, esse conceito evoluiu e, a partir do século XXI, novas discussões foram sendo incorporadas, uma vez que as formas contemporâneas de parque já não se enquadravam mais na anterior (Sakata, 2018). Nesse sentido, a autora considera que o parque urbano contemporâneo brasileiro constitui um espaço multifuncional que resulta da articulação entre o conceito de parque inicialmente atribuído no século passado e o conceito de parque natural ou unidade de conservação envolvendo espaços ambientalmente sensíveis.

A evolução desse conceito esteve associada às discussões ambientais internacionais da segunda metade do século XX, quando organismos internacionais passaram a articular conferências para estimular e fortalecer o debate global sobre os problemas ambientais (Pinheiro, 2025). A participação do Brasil nesses fóruns gerou pressão internacional que resultou na criação de diversos mecanismos que posteriormente estruturaram a política ambiental brasileira, instituída em 1981 (Moura, 2016 apud Pinheiro, 2025).

No contexto local, ainda na década de 1970, o município de Natal já havia estabelecido medidas de proteção à paisagem que, mais tarde, embasaram a institucionalização de instrumentos urbanísticos voltados à proteção, conforme registra Pinheiro (2025, p. 38).

A cidade do Natal consolidou um histórico normativo de proteção da paisagem desde o final da década de 1970 quando foram estabelecidos instrumentos de salvaguarda cênico-paisagísticos e ambientais que surgiram em decorrência da reação da sociedade civil sobre os impactos ocasionados pelo turismo que, naquela época, já sinalizavam para o estímulo do adensamento e a verticalização da zona costeira.

Destaca-se entre os instrumentos protetivos, a criação do Parque Estadual das Dunas de Natal "Jornalista Luiz Maria Alves", mais conhecido como Parque das Dunas, tornando-se o primeiro parque urbano público do Rio Grande do Norte, criado no ano de 1977. Posteriormente, houve a criação das Zonas de Proteção Ambiental (ZPA) a partir do Plano Diretor de Natal (Natal, 1994).

A partir da década de 1980 e, principalmente, apósa redemocratização do país, os acordos internacionais consolidaram a agenda ambiental, cujas as ações, segundo Moura (2016 apud Pinheiro, 2025), concentraram-se no fortalecimento institucional e na gestão das Unidades de Conservação Federais, na proteção dos ecossistemas estratégicos e na descentralização de projetos, resultando, em alguns normativos,dentre eles,a Lei nº 9.985/2000 (BRASIL, 2000), que criou o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC).

Com a virada do século, em um contexto normativo e institucional favorável, Natal ganhou mais dois parques urbanos: o Parque da Cidade Dom Nivaldo Monte, criado em 2006, e o Parque Cidade da Criança que, embora existisse como espaço público anterior a essa data, somente em 2004 foi tombado como bem de valor patrimonial. Este último tem origem histórica associada ao entorno da Lagoa Manoel Felipe a qual, em meados do século XX, já havia sido destinada poralguns estudos urbanísticos, para a implantação de uma série de parques. E mais recentemente, em 2022, foi instituído normativamente o Parque Ecológico de Capim Macio. Tanto o Parque de Capim Macio quanto o Parque da Cidade tiveram sua criação impulsionada por demandas da sociedade civil, mobilizada em resposta a retrocessos ou omissões percebidas nas políticas de proteção ambiental do município.

Três dosquatro parques, embora com sistemas de gestão e escalas distintos, estão localizados em bairros, das Regiões Administrativas (RA) Sul e Leste, onde residem populações de maiores rendas. O Parque da Cidade, por sua vez, está localizado entre as RAS Sul e Oeste do município, (figura 1), neste últimoresidem populações de pouca renda.

Figura 1 - Parques Urbanos em Natal

Fonte: Ataíde et al (2026)

Os Parques no Plano Diretor de Natal (PDN 2022)

O Plano Diretor de Natal (PDN, 2022) apresenta uma classificação de parques a partir da instituição do Sistema de Espaços Livres e Áreas Verdes do Município (SELAV), incorporado à legislação municipal a partir de 2022. Conforme dispõe o Art. 139 do referido instrumento:

> Art. 139. São componentes do Sistema de Espaços Livres e Áreas Verdes: I – zonas de proteção ambiental; II – unidades de conservação de proteção integral e de uso sustentável; III – áreas de preservação permanente; IV – parques lineares, parques urbanos, bosques e jardins botânicos; V – orlas marítimas, fluviais, estuarinas e lacustres; VI– vias verdes, corredores e trampolins ecológicos; VII – praças; VIII – espaços livres e áreas verdes de logradouros públicos, incluindo canteiros, rotatórias, vielas, ciclovias, escadarias; IX- espaços livres e áreas verdes de instituições públicas; X – espaços livres, áreas verdes e institucionais originárias de parcelamento do solo; XI – cemitérios; XII – horta comunitária; XIII– coleção arbórea; XIV – passeios públicos (Natal, 2022a, p. 43).

Embora a formulação do artigo contemple explicitamente a inserção de parques lineares, parques urbanos, bosques e jardins botânicos como componentes do sistema, observa-se que o SELAV encontra-se estruturado com ênfase predominante na conservação ambiental, apresentando, conforme apontado por Pinheiro (2025a).

O PDN (2022) apresenta, ainda, definições de parque fundamentadas em critérios como dimensão territorial, inserção no tecido urbano e finalidade de proteção ambiental. Contudo, verificam-se inconsistências relevantes nessa formulação: por um lado, o instrumento institui uma categoria específica denominada "parque urbano" no âmbito do sistema, sem, no entanto, apresentar uma definição conceitual explícita para esse termo. Por outro lado, tampouco especifica os critérios que caracterizariam um jardim botânico, categoria também prevista no Art. 139. As definições efetivamente apresentadas pelo Plano Diretor restringem-se às seguintes categorias:

Bosque urbano – Conjunto de espécimes vegetais de porte arbóreo, composto por 3 (três)ou mais gêneros de árvores, cujas copas cubram o solo em mais de 40% (quarenta por cento)da sua superfície, com dimensões entre 10.000m² (dez mil metros quadrados) e 50.000m²(cinquenta mil metros quadrados); Parque – Área verde com dimensões a partir de 50.000m2 (cinquenta mil metros quadrados), destinada ao lazer passivo, à preservação da flora e da fauna ou de outros atributos naturais que possam caracterizar a unidade de paisagem na qual o parque está inserido, bem como promover a melhoria das condições de conforto ambiental na cidade; Parque linear – Intervenção urbanística construída ao longo de cursos d'água, tais como rios e córregos ou outros componentes da rede hídrica, capaz de conectar áreas verdes, proteger e recuperar ecossistemas, controlar enchentes, abrigar práticas de lazer, esporte e cultura, além de contribuir com alternativas não motorizadas de mobilidade urbana; Parque Natural Municipal – Categoria de Unidade de Conservação de Proteção Integral criada pelo Município que tem como objetivo a preservação de ecossistemas naturais de grande relevância ecológica e beleza cênica, vedado o uso direto dos recursos naturais é permitida a realização de pesquisas científicas, o desenvolvimento de atividades de educação e interpretação ambiental, de recreação em contato com a natureza e de turismo ecológico (Natal, 2022a, p. 88 e 93).

Ao associar as categorias previstas no SELAV às definições conceituais apresentadas, observa-se que o PDN (2022) contém significativos erros, uma vez que as definições não correspondem às categorias instituídas. Ademais, os critérios adotados mostram-se pouco precisos e não uniformes, ora fundamentados em parâmetros dimensionais, ora em critérios de proteção ambiental, sem que se estabeleça uma leitura interseccionada e integrada entre esses parâmetros. Dessa forma, a fragilidade conceitual compromete a capacidade do instrumento de reconhecer a diversidade tipológica de parques existentes no município.

Os Parques em Natal

Parque Estadual das Dunas de Natal "Jornalista Luiz Maria Alves"

O Parque das Dunas é o maior parque urbano do município e caracteriza-se por um extenso cordão de dunas sendo inseridona ZPA-2[5].O parque protege um ecossistema de dunas localizado junto ao Oceano Atlântico, constituindo-se em um dos principais remanescentes costeiros de paisagem natural sob estratégias de proteção ambiental. Faz fronteira com a Via Costeira[6], ainda que a rodovia e a faixa de

praia permaneçam fora de seus limites oficiais, e próximo ao Centro de Convenções de Natal, cuja área correspondente foi desapropriada dos limites do parque em 1997 (Rio Grande do Norte, 1997)[7]. Sua preservação foi consolidada ao longo da década de 1970, com destaque para o Decreto Estadual nº 7.237 de 22 de novembro de 1977 (Rio Grande do Norte, 1977), que declarou de utilidade pública, para fins de desapropriação, a área de dunas adjacente ao Atlântico, e o Decreto Estadual nº 7.538 de 19 de janeiro de 1979 (Rio Grande do Norte, 1979), que oficializou o Regulamento do Parque das Dunas(Ataíde et al., 2026). O setor de visitação pública do parque, conhecido como Bosque dos Namorados, funciona como importante núcleo de educação e pesquisa ambiental. O espaço abriga uma unidade de exposição da vegetação nativa, um viveiro de mudas e um centro de pesquisas, além de biblioteca própria e do Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente (IDEMA). Conta ainda com acesso a trilhas ecológicas e com áreas voltadas à integração da população e ao lazer, como lago artificial, anfiteatro Pau Brasil, parque infantil e setor de recreação. O Parque possui plano de manejo, revisado em 2025 (Ataíde et al., 2026). O Parque das Dunas enquadra-se na categoria de parques de macroescala, dada a sua extensão, por se tratar de um parque que, simultaneamente, protege recursos naturais e oferece trilhas e ambientes propícios ao lazer e à recreação. Trata-se, ainda, de uma Unidade de Conservação (UC) de Proteção Integral (figura 2).

Figura 2 - Parque Estadual das Dunas de Natal “Jornalista Luiz Maria Alves”

Fonte: Ataíde et al (2026)

Parque Natural Municipal da Cidade do Natal "Dom Nivaldo Monte"

A criação do Parque Natural Municipal da Cidade do Natal "Dom Nivaldo Monte" (Parque da Cidade) foi instituído pelo Decreto Municipal nº 8.078, de 13 de dezembro de 2006 (Natal, 2006),tendo sua posse territorial posteriormente regularizada através dos decretos nº 8.608/08 (Natal, 2008) que visou a desapropriação por utilidade pública. Os limites e a área total da unidade de conservação foram ampliados pelo decreto nº 11.446/2017 (Natal, 2017) consolidando normativamente sua proteção frente ao avanço do crescimento urbano do município.

O parque encontra-se parcialmente inserido na Zona de Proteção Ambiental 1 (ZPA-1), cujo objetivo é salvaguardar o campo dunar continental situado nos bairros do Pitimbu, Candelária e Cidade Nova, constituindo fração territorial fundamental de proteção ambiental no contexto do macrozoneamento urbano de Natal. Em razão da integridade e da relevância ecológica de sua cobertura das dunas e de vegetação nativa costeira, o parque recebeu, em 2019, o título de Posto Avançado da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, concedido pela UNESCO (Ataíde et al., 2026). A riqueza vegetal desse ecossistema de dunas continentais foi objeto de inventário científico detalhado, com destaque para a catalogação de espécies.

O parque, caracteriza-se ainda, por sua articulação com o entorno, ao contar com dois acessos principais: o acesso leste, localizado no bairro de Candelária na RA Sul,no prolongamento da antiga Avenida Prudente de Morais, atual Avenida Prefeito Omar O'Grady; e o acesso oeste, que conecta o parque diretamente ao bairro de Cidade Nova. Quanto à sua gestão ambiental e as diretrizes de uso público, são orientadas pelo Plano de Manejo publicado em 2020 (Natal, 2020), sendo administrado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB) (Ataíde, et al., 2026).

Configura-se, ainda, como importante polo de integração comunitária, abrigando programas como o "Adote o Verde" e eventos de educação e lazer coletivo, a exemplo da observação astronômica do eclipse solar de 2023, que mobilizou milhares de pessoas (Ataíde et al., 2026). Assim como o Parque das Dunas, o Parque da Cidade enquadra-se na categoria de parques da macroescala, dada a sua extensão, também oferece trilhas pavimentadas e naturais (figura 3).

Figura 3 - Parque Natural Municipal da Cidade do Natal "Dom Nivaldo Monte"

Fonte: Ataíde et al (2026)

Parque Cidade da Criança

O Parque Cidade da Criança apresenta características ambientais, de infraestrutura e de patrimônio histórico-cultural que o definem como um espaço público singular na capital potiguar. O parque tem seus limites territoriais e acesso principal, tanto para pedestres quanto para veículos, definidos pela Avenida Rodrigues Alves no bairro do Tirol, RA Leste, fazendo fronteira também com o Canal do Baldo e sendo

estruturado em torno da Lagoa Manoel Felipe, principal elemento natural e hídrico da área. A infraestrutura de lazer e serviços é voltada à integração comunitária, incluindo atividades na Lagoa Manoel Felipe, como passeios de pedalinho, além de trapiche e áreas de recreação, como parque infantil de madeira. Conta ainda com quiosques, refeitório, salão de festas e passeios pavimentados ao redor da lagoa e equipamentos culturais e educacionais, como anfiteatro ao ar livre, camarim, biblioteca, capela e a chamada "Casa da Vovó". Há ainda estruturas de apoio e segurança, contando com guarita, posto de saúde e instalações do Batalhão de Policiamento Ambiental, este último com anexo destinado a animais apreendidos. Ainda, com o intuito de fomentar a conscientização ecológica e a preservação ambiental, o parque abriga um Núcleo de Educação Ambiental e o Museu do Meio Ambiente (Ataíde, et al., 2026).

Diferente de outros espaços protegidos de Natal, criados essencialmente como unidades de conservação municipais, a preservação do Parque Cidade da Criança consolidou-se por meio de seu reconhecimento como patrimônio histórico e cultural do estado do RN.O espaço foi oficialmente tombado pelo Decreto Estadual nº 17.969, de 6 de dezembro de 2004 (Rio Grande do Norte, 2004), o qual determinou o tombamento conjunto da sede da Fundação José Augusto, da Biblioteca Pública Câmara Cascudo e da própria Cidade da Criança (Ataíde et al., 2026). O Parque Cidade da Criança integra a categoria de parques na microescala observando asua extensão territorial (figura 4).

Figura 4 - Parque Cidade da Criança

Fonte: Ataíde et al (2026)

Parque Ecológico de Capim Macio

O Parque Ecológico de Capim Macio foi criado a partir do engajamento social no ano de 2008 e reconhecido através da portaria nº 033/2022-GS/SEMSUR, de 13 de setembro de 2022 (Natal, 2022b) que o consolidou como modelo de apropriação, lazer e preservação ambiental. O parque tem seus limites em fronteira direta com vias residenciais locais e com residências de médio e alto padrão. A infraestrutura de lazer e uso público do parque inclui passeios e caminhos pavimentados para caminhadas com arborização, parque infantil em madeira, áreas de recreação infantil, guarita de acesso de

pedestres, além de espaços abertos destinados à convivência coletiva e à contemplação. A sua gestão estrutura-se sob uma gestão compartilhada através da SEMURB e da Associação de Amigos e Moradores de Capim Macio (ACM) (Ataíde, et al., 2026). O Parque Ecológico integra os parques na microescala (figura 5).

Figura 5 - Parque Ecológico de Capim Macio

Fonte: Ataíde et al (2026)

A análise dos quatro parques identificados evidencia uma aproximação quanto às categorias, à gênese, à gestão e à escala territorial, permitindo sua organização em dois grandes grupos. Na macroescala, situam-se o Parque das Dunas e o Parque da Cidade, ambos classificados como unidades de conservação. Ambos compartilham, portanto, expressiva dimensão territorial e vínculo direto com a proteção de ecossistemas naturais, ainda que sob esferas de governo distintas.

Na microescala, por sua vez, encontram-se o Parque Cidade da Criança e o Parque Ecológico de Capim Macio, caracterizados por áreas territoriais consideravelmente menores, e por processos de institucionalização de naturezas distintas dos anteriores. O primeiro configura-se como bem tombado estadual, criado em 2004 sob gestão da Fundação José Augusto, tendo sua proteção legal fundamentada no valor histórico-cultural do espaço, e não em critérios de conservação ambiental propriamente ditos. Já o segundo, o Parque Ecológico de Capim Macio, criado em 2008, apresenta modelo de gestão compartilhada entre a Secretaria Municipal de Serviços Urbanos de Natal (SEMUR) e a Associação de Amigos e Moradores de Capim Macio (ACM).

A distinção entre macro e microescala não se limita apenas à dimensão territorial dos parques, reflete também as diferenças quanto à natureza da proteção legal, à esfera de gestão, à origem do processo de institucionalização e aos equipamentos e atividades contidos neles (quadro 1).

Quadro 1 - Quadro síntese

Fonte: A autora (2026)

[5] O macrozoneamento incorpora a área do parque embora a sobreposição entre o Parque das Dunas e a ZPA 2 apresente particularidades: enquanto a ZPA 2 se limita, quase por completo, aos espaços livres compostos pelas dunas e pela vegetação incluindo a área de uso público Bosque dos Namorados, o Parque das Dunas abrange também a área do Instituto de Desenvolvimento Sustentável do Rio Grande do Norte (IDEMA) e uma fração territorial ocupada pelo Exército Brasileiro. O Parque das Dunas possui extensão territorial de 1.135,09 ha, ao passo que a ZPA 2 possui 1.093,28 ha, sobreposição essa que pode ser observada na figura 2.

[6] A via costeira e a faixa de praia estão fora dos limites do Parque (Ataíde et al., 2026).

[7] O Centro de Convenções de Natal: área do Parque das Dunas desapropriada pelo Decreto n° 13. 301 de 04 de abril de 1997 (Rio Grande do Norte, 1997).

Conclusão

Este artigo teve como objetivo identificar, mapear, classificar e categorizar os parques em Natal, evidenciando a existência de duas escalas distintas, e respectivas inserçõesno tecido urbano: a macroescala e a microescala. A partir desse trabalho, foi possível identificar semelhanças quanto à gênese, às atividades realizadas e aos modelos de gestão adotados, bem como verificar que, a partir da dimensão territorial de cada parque, estes assumem diferentes responsabilidades no contexto urbano e ambiental da cidade.

Dessa forma, considera-se que a pesquisa alcançou os objetivos propostos, constituindo-se como instrumento referencial para futuras investigações sobre os parques urbanos de Natal. Destaca-se a relevância dessa classificação tipológica para a gestão dos parques na medida em que, embora o PDN 2022 reconheça oficialmente apenas determinados espaços sob a categoria de parque, a metodologia adotada no artigo está fundamentada nos critérios do grupo QUAPÁ-SEL, o que permite incorporar à análise outros espaços que, embora não categorizados formalmente pela legislação municipal, cumprem funções equivalentes às de um parque urbano, a exemplo do Parque Cidade da Criança.

Referências

ATAÍDE; Ruth Maria da Costa; JULIANELLI, Anna Rachel Baracho; SILVA, Emmanuelle Séfora Cabral; PINHEIRO, Fernanda Souza. Natal. In: SAKATA, Francine Gramacho; CASIMIRO, Matheus de Vasconcelos. **Parques Urbanos no Brasil 2.** 1ª ed, São Paulo, Rede QUAPÁ-SEL: 2026. p. 87-109.

BRASIL. República Federativa do. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000.** Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília: Senado, 2000.

NATAL, Prefeitura Municipal do. **Lei Complementar nº 07, de 05 de agosto de 1994.** Dispõe sobre o Plano Diretor de Natal e dá outras providências. Diário Oficial do Município, Natal 07 ago. 1994.

NATAL, Prefeitura Municipal do. **Decreto nº 8.078, de 13 de dezembro de 2006**. Cria o Parque da Cidade do Natal e dá outras providências. Diário Oficial do Município, Natal, 2006.

NATAL, Prefeitura Municipal do. **Decreto nº 8.608, de 11 de dezembro de 2008.** Declara de utilidade pública para fins de desapropriação imóveis que especifica e dá outras providências. Diário Oficial do Município, Natal, 2008.

NATAL, Prefeitura Municipal do. Secretaria de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB). **Plano de Manejo do Parque Natural Municipal da Cidade do Natal**. Natal, 2020. 76p.

NATAL, Prefeitura Municipal do. **Lei Complementar nº 208, de 07 de março de 2022.** Dispõe sobre o Plano Diretor de Natal, e dá outras providências. Diário Oficial do Município, Natal, 07 mar. 2022a.

NATAL, Prefeitura Municipal do. **Portaria nº 033/2022-GS/SEMSUR, de 13 de setembro de 2022.** Art. 1o - A presente portaria tem como objetivo nortear as regras, normas e diretrizes de uso, visitação e convivência no âmbito do Parque Ecológico de Capim Macio, em consonância com a legislação vigente. Diário Oficial do Município, Natal, 2022b.

MACEDO, Silvio Soares; SAKATA, Francine Gramacho. **Parques urbanos no Brasil.** São Paulo: EDUSP, 2010.

PINHEIRO, Fernanda Souza; ATAIDE, Ruth Maria da Costa. **O Sistema de Espaços Livres no Plano Diretor de Natal: contradições entre formulação e práticas.** In: XXXVI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UFRN, 2025, Natal. ANAIS GRANDE ÁREA DO CONHECIMENTO CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS, LETRAS E ARTES, 2025. p. 1-761.

PINHEIRO, Fernanda Souza. **Reimaginar a paisagem em dissolução: articulação de um sistemas de espaços livres no entorno da ZPA 8.** Monografia (Graduação em Arquitetura e Urbanismo). 141p. Natal. UFRN, 2025.

RIO GRANDE DO NORTE, Governo do Estado do. **Decreto nº 7.237, de 22 de novembro de 1977.** Declara de utilidade pública, para fins de desapropriação, bens situados na área das dunas, adjacente ao Oceano Atlântico, no município de Natal. Diário Oficial do Estado, Natal, 22 nov. 1977. 1977. Disponível em: https://documentacao.socioambiental.org/ato_normativo/UC/4142_20200204_154338.pdf. Acesso em: 30 mar. 2026.

RIO GRANDE DO NORTE, Governo do Estado do. **Decreto nº 7.538, de 19 de janeiro de 1979.** Aprova o Regulamento do Parque das Dunas. Diário Oficial do Estado, Natal, 19 jan. 1979. Disponível em: https://documentacao.socioambiental.org/ato_normativo/UC/4143_20200204_155236.pdf. Acesso em: 30 mar. 2026.

RIO GRANDE DO NORTE, Governo do Estado do. **Decreto n° 13.301, de 04 de abril de 1997.** Declara como utilidade pública, para fins de desapropriação pelo Estado do Rio Grande do Norte, bem imóvel e todo o acervo patrimonial necessário ao seu funcionamento, de propriedade da Companhia de Processamento de Dados do Rio Grande do Norte - DATANORTE, e determina outras providências. Diário Oficial do Estado, Natal, 04 abr. 1997.

RIO GRANDE DO NORTE, Governo do Estado do. **Decreto nº 17.969, de 6 de dezembro de 2004.** Tomba a sede da Fundação José Augusto, a Biblioteca Pública Câmara Cascudo e a Cidade da Criança, localizados no município de Natal, neste Estado. Diário Oficial do Estado, Natal, 7 dez. 2004. Disponível em: http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/gac/DOC/DOC000000000060161.PDF. Acesso em: 30 mar. 2026.

SAKATA, Francine Gramacho. **Parques urbanos no Brasil - 200 a 2017.** Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). 348p. São Paulo. USP, 2018.

Anexos



Figura 1 - Parques Urbanos em Natal



Figura 2 - Parque Estadual das Dunas de Natal “Jornalista Luiz Maria Alves”



Figura 3 - Parque Natural Municipal da Cidade do Natal "Dom Nivaldo Monte"



Figura 4 - Parque Cidade da Criança



Figura 5 - Parque Ecológico de Capim Macio



Quadro 1 - Quadro síntese

CÓDIGO: HS0964

AUTOR: AMANDA BEATRIZ LEAO BORGES

ORIENTADOR: ANNA RACHEL BARACHO EDUARDO JULIANELLI

TÍTULO: Paisagem e patrimônio em diálogo: a requalificação da Praça Augusto Severo

Resumo

Esta pesquisa analisa a paisagem urbana e a dinâmica espacial da Praça Augusto Severo (Natal/RN), diagnosticando suas transformações morfológicas, visuais e sociais decorrentes das obras do PAC Cidades Históricas. A metodologia articulou levantamento bibliográfico e iconográfico, pesquisa de campo, inventário florístico, representação gráfica dos elementos do espaço e análise visual fundamentada em referenciais de conservação patrimonial e de leitura da paisagem urbana. Os resultados indicam que, apesar da preservação física do conjunto edificado histórico envolvente, houve alterações de composição da massa vegetal. O espaço padece de esvaziamento funcional e pouca permanência de pedestres.

Palavras-chave: Praça Augusto Severo; Paisagem urbana; Patrimônio cultural; Análise vi

TITLE: Landscape and heritage in dialogue: the revitalization of Augusto Severo Square

Abstract

This study analyzes the urban landscape and spatial dynamics of Augusto Severo Square (Natal/RN), diagnosing its morphological, visual, and social transformations resulting from the PAC Cidades Históricas (PAC Historic Cities Program) works. The methodology combined a literature and iconographic review, fieldwork, a floristic inventory, graphic representation of spatial elements, and visual analysis based on heritage conservation frameworks and urban landscape interpretation. The results indicate that, despite the physical preservation of the surrounding historic built ensemble, changes occurred in the composition of the vegetation cover. The space suffers from functional vacancies and low pedestrian dwell time.

Keywords: Augusto Severo Square; Urban landscape; Cultural heritage; Visual anal

Introdução

A Praça Augusto Severo, localizada no tradicional e histórico bairro da Ribeira, constitui-se como um dos primeiros espaços públicos de uso coletivo voltado a fins recreativos na cidade de Natal (RN). Situada dentro do perímetro do "Conjunto Arquitetônico, Urbanístico e Paisagístico" tombado pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) desde 2010 (Processo nº 1.558-T-08), a praça abriga uma relevante carga simbólica, histórica e espacial na trajetória da capital potiguar, como pode ser visto a localização na figura 01.

O presente trabalho caracteriza-se como a retomada e o desdobramento da pesquisa "Valores da paisagem: inventário e identificação de atributos patrimoniais das praças do Centro Histórico de Natal-RN", vinculada ao projeto guarda-chuva "Palimpsesto: O redesenho da Paisagem e as Intervenções do PAC Cidades Históricas no Centro de Natal (RN)". Na etapa investigativa anterior (realizada entre 2024 e 2025), o estudo focou nas praças do bairro da Cidade Alta (como a Praça Sete de Setembro, André de Albuquerque e Padre João Maria). A análise da Praça Augusto Severo não pôde ser concluída à época devido ao fechamento e interdição do espaço para o início das obras físicas de requalificação urbana contratadas pelo PAC Cidades Históricas (retomadas no início de 2025).

Figura 01: Mapa do centro histórico de Natal com destaque para a poligonal de tombamento. Fonte: Nobre et al. (2015)

Com a conclusão e entrega formal das obras de reforma da Praça Augusto Severo, tornou-se viável aplicar in loco os procedimentos analíticos e de inventário diretamente no espaço recém-reabilitado. A intenção central desta pesquisa é analisar de que maneira o novo projeto executado dialoga com a preservação ou descaracterização da ambiência, dos atributos materiais e imateriais e da significância histórica da praça.Vale destacar que a intenção inicial do plano de trabalho era confrontar a análise do projeto sobre o olhar da gestão, tanto no que tange à análise dos pareceres do IPHAN quanto das secretarias envolvidas em âmbito estadual e municipal. Todavia, por limitações de tempo e acesso aos documentos, esse objetivo inicial não pôde ser alcançado.

Assim, a metodologia já aplicada nas etapas anteriores do projeto serviu de base para o presente estudo. No que se refere à fundamentação do processo analítico, foram utilizadas referências teóricas e normativas fundamentais sobre jardins históricos e paisagem patrimonial, como o Manual de Intervenção em Jardins Históricos (IPHAN, 1999), as formulações de Nobre et al. (2008; 2015) sobre a evolução dos jardins de Natal, além de diretrizes consagradas nas Cartas Patrimoniais (Cury, 2000), Rufinoni (2013) e Zanirato (2020). Na vertente de leitura e catalogação visual e florística, adotar-se-ão os aportes metodológicos do Laboratório da Paisagem da UFPE (Carneiro et al., 2013; Carneiro, Silva e Rolim, 2018) e a catalogação da paisagem urbana de Períes e Barraud (2023).

A partir dessas premissas e arcabouços, o trabalho desdobra-se apresentando as análises dos dados e os resultados obtidos na investigação de campo conduzida na recém-reformada Praça Augusto Severo.

Metodologia

Para a fundamentação e o desenvolvimento da pesquisa, adotou-se uma abordagem qualitativa de natureza analítico-exploratória, estruturada em pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, levantamento de campo e sistematização gráfica do espaço urbano.

A primeira etapa consistiu na pesquisa bibliográfica para a construção do aporte teórico-conceitual sobre conservação da paisagem urbana, evolução dos jardins públicos e patrimônio cultural. A fundamentação pautou-se em diretrizes do IPHAN (1999) e da Carta de Florença (ICOMOS, 1981), em estudos sobre a evolução dos espaços livres em Natal (Nobre; Pereira; Ribeiro, 2008; Nobre et al., 2015), e em discussões sobre intervenções em centros históricos (Rufinoni, 2013; Zanirato 2020) e tipologias de praças (Macedo, 1999; Robba; Macedo, 2002). A abordagem sobre paisagem, memória e apropriação do espaço público apoiou-se em Claval (2002), Yázigi (1999) e Beringuier e Beringuier (1991).

A pesquisa documental baseou-se no levantamento e na análise dos projetos executivos, mapas e pranchas cartográficas relativas ao Projeto básico de arquitetura Paisagística/Acessibilidade - Reabilitação do Centro Histórico de Natal do Governo Estadual, , permitindo identificar as intenções projetuais e as transformações morfológicas propostas para a praça. Complementarmente, a partir do acervo do prof. Paulo Nobre, realizou-se a produção de uma linha do tempo com a intenção de sintetizar as informações históricas e iconográficas obtidas através desses documentos, mapeando a evolução do espaço ao longo das décadas.

A etapa empírica compreendeu a realização de visitas de campo in loco à Praça Augusto Severo. Utilizaram-se como instrumentos a observação direta, a apreensão visual dos fluxos e do uso do espaço em diferentes horários e o levantamento fotográfico sistemático do patrimônio edificado, do estado de conservação e da vegetação existente.

Por fim, a sistematização dos dados organizou-se através da aplicação da Ficha de Identificação da Paisagem, elaborada com base na metodologia de inventário de Períes e Barraud (2023) e nos aportes de catalogação do Laboratório da Paisagem da UFPE (Carneiro et al., 2013; Carneiro; Silva; Rolim, 2018), além do mapeamento dos elementos estruturantes do espaço e de suas dinâmicas de apropriação a partir do modelo de Beringuier e Beringuier (1991).

Resultados e Discussões

A Praça Augusto Severo, localizada no coração do bairro da Ribeira em Natal/RN, constitui um dos espaços públicos de maior relevância histórica, cultural e urbana da cidade. Originada no final do século XIX sobre o antigo aterro da Campina da Ribeira e consolidada no início do século XX como uma emblemática Praça-Jardim Eclética projetada pelo arquiteto Herculano Ramos, a praça passou por sucessivas transformações morfológicas ao longo das décadas — incluindo o seccionamento viário em 1938 e reformas de viés modernista e contemporâneo que alteraram seu traçado e sua vegetação (Nobre; Pereira; Ribeiro, 2008). Hoje, apresentando-se essencialmente como uma esplanada readequada ao tráfego de pedestres e à intermodalidade do transporte público, a praça desempenha papel fundamental na estruturação da memória coletiva e da paisagem do centro histórico natalense. A síntese dessa evolução histórica e morfológica, elaborada a partir da documentação do acervo de Paulo Nobre, encontra-se sistematizada na linha do tempo a seguir (Figura 02).

Figura 02: Linha do tempo Praça Augusto Severo. Fonte: Elaborado pela autora (2026), com base em Nobre, Pereira e Ribeiro (2008) e ampliada pela pesquisa.

O seu entorno imediato é emoldurado por um conjunto de edificações de valor arquitetônico e institucional que atestam as diferentes fases de expansão e modernização da capital potiguar. Destacam-se no perímetro o suntuoso Teatro Alberto Maranhão, ícone da arquitetura eclética de início do século XX; o prédio do antigo Grupo Escolar Augusto Severo ; o palacete da antiga Estação Ferroviária Central; além do edifício da antiga Estação Rodoviária de Natal — estrutura modernista da década de 1960 que abrigou posteriormente o Museu de Cultura Popular Djalma Maranhão e que se encontra atualmente desativado. Essa densa convergência de equipamentos culturais, educacionais e de transporte confere ao entorno da praça uma centralidade histórica singular, conectando a memória social do bairro à dinâmica cotidiana da cidade.

Esse rico suporte arquitetônico e urbano sustenta uma série de atributos e valores patrimoniais fundamentais para a leitura e preservação do espaço, uns ainda mantidos em sua autenticidade e outros já esquecidos. Observam-se o valor histórico, manifesto na trajetória do logradouro como palco de transformações urbanas desde o período higienista; o valor artístico e arquitetônico, presente no traçado e na composição, na linguagem dos monumentos e edifícios lindeiros; o valor cívico, representado pelas homenagens ao aviador Augusto Severo e pela centralidade política e social do bairro; o valor paisagístico, expresso na morfologia, nas visuais e na relação com a a escala urbana da Ribeira; o valor de uso, ligado à função intermodal e de circulação diária de pedestres; e o valor identitário, que vincula o lugar ao sentimento de pertencimento da população natalense. A síntese desses atributos, sistematizada segundo a leitura dos componentes morfológicos, botânicos e conservacionais do logradouro, encontra-se representada na Figura 03 com base na metodologia de Períes e Barraud (2023, adicionando-se uma análise das apropriações atuais e elementos estruturados dessa paisagem.

Figura 03: Ficha de identificação da paisagem da Praça Augusto Severo. Fonte: Autora (2026)

Paralelamente aos seus valores patrimoniais e simbólicos, a Praça Augusto Severo desempenha um papel espacial complexo na articulação funcional e visual com o tecido urbano que a circunda. A configuração atual do espaço revela uma inter-relação dinâmica com o seu entorno, marcada pela presença de uma densa massa vegetal que dialoga diretamente com as variadas volumetrias das edificações perimétricas — as quais abrigam usos residenciais, educacionais como a antiga escola, equipamentos culturais como o teatro e imóveis históricos em processo de restauro. Essa composição é atravessada também pelas dinâmicas da mobilidade contemporânea, evidenciadas pela circulação e permanência de automóveis no estacionamento situado na porção posterior do logradouro. Compreender a praça sob essa perspectiva integrada exige prendê-la como uma janela visual na qual a massa arbórea, o patrimônio edificado e os fluxos de transporte se justapõem e se condicionam mutuamente, conforme sistematizado na Figura 04 com base em Beringuier e Beringuier (1991), que aborda as relações entre forma, função e estrutura na paisagem.

Figura 04: Análise dos elementos estruturantes da praça. Fonte: Autora (2026)

A análise da figura complementar (Figura 05), elaborada a partir da sobreposição do traçado da praça entre os anos de 2006 e 2026, torna explícita a condição do espaço público enquanto palimpsesto urbano. Ao sobrepor essas duas temporalidades, revelam-se as marcas do período de reforma pelo qual o espaço passou, expondo as substituições, apagamentos e permanências inscritos no desenho da praça. Observa-se que a intervenção recente imprimiu uma geometria visivelmente mais retilínea ao traçado, ao mesmo tempo em que promoveu a supressão de vegetação existente, com a retirada de algumas palmeiras e árvores. Essa representação gráfica sobreposta não apenas evidencia as transformações físicas na morfologia do lugar, mas também convida à reflexão sobre como sucessivas intervenções retrabalham a memória e a dinâmica espacial do centro urbano ao longo de duas décadas.

Figura 05: Comparativo de traçados e composição vegetal em 2006 e 2026. Fonte: Autora (2026) com base em Governo do Estado do RN (2019) e acervo de Paulo José Lisboa Nobre.

Diante desse cenário, conclui-se que as alterações morfológicas observadas entre 2006 e 2026 superam a mera reconfiguração estética do traçado ou a redistribuição da massa vegetal. Ao alterar a geometria e o sombreamento do espaço público, a intervenção pode incidir diretamente na apropriação cotidiana e no conforto ambiental do pedestre, ressignificando as formas de uso e permanência na praça. Assim, a sobreposição temporal reafirma a praça do centro urbano como um organismo dinâmico e em contínua reescrita, onde as decisões do desenho urbano moldam a experiência coletiva do lugar.

Esses desdobramentos físicos e espaciais rebatem diretamente nas dinâmicas sociais de apropriação pós-obra. Conforme relatado pela imprensa local (Tribuna do Norte, 2026), pouco tempo após a conclusão das reformas e a reabertura do espaço, a Praça Augusto Severo passou a registrar episódios de vandalismo, depredação e furto de mobiliários urbanos. Como reflexo desse processo, o logradouro apresenta atualmente sinais de degradação física e baixa

apropriação pelo público em geral, caracterizando-se pela utilização majoritária como área de permanência para pessoas em situação de rua.

Conclusão

A presente pesquisa buscou analisar as transformações morfológicas e socioespaciais ocorridas no espaço público urbano ao longo das duas últimas décadas (2006–2026), tomando como objeto de estudo as alterações de traçado, permeabilidade e composição vegetal e seus impactos na dinâmica cotidiana dos usuários.

Os resultados obtidos confirmam a premissa de que o espaço público atua como um verdadeiro palimpsesto urbano, no qual diferentes temporalidades se sobrepõem, revelando apagamentos, permanências e reconfigurações. A análise comparativa entre as cartografias e registros de 2006 e 2026 evidenciou que a reforma recente imprimiu uma geometria visivelmente mais retilínea e rígida ao desenho da praça. Embora essa intervenção tenha buscado uma reorganização visual e funcional, a supressão de indivíduos arbóreos e a alteração da composição e da massa vegetal existente comprometeram atributos essenciais para a escala humana, tais como o sombreamento, o conforto microclimático e a atratividade das áreas de permanência. A massa vegetal da Praça Augusto Severo configura-se também como um elemento estruturante dessa paisagem cultural.

Sob a ótica do urbanismo voltado para as pessoas, a pesquisa demonstra que a eficiência de um espaço público não se mede apenas pela simplificação de suas linhas ou por soluções estéticas pontuais, mas pela sua capacidade de acolher seus valores históricos, o fluxo de pedestres, promover a convivência e preservar a memória coletiva do centro urbano. A rigidez geométrica e a redução do sombreamento tendem a desencorajar a permanência prolongada, transformando áreas de convívio em meros espaços de passagem.

Por fim, este estudo ressalta a importância de que futuras intervenções urbanísticas adotem diretrizes integradas de desenho urbano e preservação, garantindo que o desenvolvimento físico das cidades caminhe lado a lado com a memória coletiva. .

Referências

BERINGUIER, C.; BERINGUIER, P. La lecture du paysage: un outil pour l'aménagement. Paris: Éditions CNRS, 1991.

CARNEIRO, A. R. S. et al. Metodologia de inventário de jardins históricos: a experiência do Laboratório da Paisagem da UFPE. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2013.

CARNEIRO, A. R. S.; SILVA, A. P.; ROLIM, A. C. Catalogação e leitura visual de jardins públicos em Pernambuco. Recife: UFPE, 2018.

CARVALHO, Ícaro. Praça Augusto Severo padece há um ano com obras paralisadas. Tribuna do Norte, Natal, 04 mar. 2023. Disponível em:https://tribunadonorte.com.br. Acesso em: 10 ago. 2026.

CLAVAL, P.. A Geografia Cultural. 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2002.

COM OBRA parada há 4 anos, Praça Augusto Severo deverá passar por nova licitação em Natal. G1 RN, Natal, 24 ago. 2023. Disponível em:https://g1.globo.com/rn. Acesso em: 10 ago. 2026.

CURY, (Org.). Cartas Patrimoniais. 2. ed. Rio de Janeiro: IPHAN, 2000. Disponível em:http://portal.iphan.gov.br. Acesso em: 10 ago. 2026.

ICOMOS – Conselho Internacional de Monumentos e Sítios. Carta de Florença: Jardins Históricos. Florença, Itália: ICOMOS, 1981. Disponível em:http://portal.iphan.gov.br. Acesso em: 10 ago. 2026.

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Manual de intervenção em jardins históricos. Brasília, DF: Ministério da Cultura / IPHAN, 1999. Disponível em:http://portal.iphan.gov.br. Acesso em: 10 ago. 2026.

MACEDO, S. S.. Quadro do paisagismo no Brasil. São Paulo: FAUUSP, 1999.

NESI, Celina. Natal: evolução urbana e história. Natal: Editora Clima, 1997.

NOBRE, Paulo J. L.; PEREIRA, Marizo V.; RIBEIRO, Isaías da S. Um Jardim Esquecido na Ribeira do Natal. In: Arquimemória 3 - Sobre a Preservação do Patrimônio Edificado, 2008, Salvador. Anais do Arquimemória 3. Salvador:IAB-BA, 2008 . Acesso em: 10 ago. 2026.

NOBRE, Paulo José Lisboa et al. Evolução dos espaços livres públicos e jardins históricos em Natal/RN. Natal: EDUFRN, 2015.

PERÍES, L.; BARRAUD, S. Ficha de identificação e inventário da paisagem urbana patrimonial. São Paulo: Oficina de Textos, 2023.

PINTO, Irineu. História da Cidade do Natal. Natal: Imprensa Oficial, 1971.

PRAÇA Augusto Severo deve ser reinaugurada nesta quinta-feira. Portal Grande Ponto, Natal, 25 fev. 2026. Disponível em: https://grandeponto.com.br. Acesso em: 10 ago. 2026.

PRAÇA Augusto Severo tem peças de revestimento arrancadas por vândalos. Tribuna do Norte, Natal, 30 mar. 2026. Disponível em:https://tribunadonorte.com.br. Acesso em: 10 ago. 2026.

REFORMA da Praça Augusto Severo depende do Iphan. Tribuna do Norte, Natal, 01 mar. 2024. Disponível em:https://tribunadonorte.com.br. Acesso em: 10 ago. 2026.

ROBBA, Fábio; MACEDO, Silvio Soares. Praças brasileiras. São Paulo: Edusp, 2002.

RUFINONI, Manoela Rossinetti. Preservação e restauro urbano: intervenções em sítios históricos. São Paulo: FAPESP / Annablume, 2013.

SEMURB – Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo. Projeto de reabilitação e intervenção da Praça Augusto Severo: pranchas cartográficas e memoriais. Natal: Prefeitura Municipal do Natal, 2019. Acesso em: 10 ago. 2026.

YÁZIGI, Eduardo. A alma do lugar: turismo, planejamento e identidade. São Paulo: Contexto, 1999.

ZANIRATO, Sílvia Helena. Patrimônio cultural e conservação urbana contemporânea. São Paulo: Alameda, 2020.

Anexos



Figura 01: Mapa do centro histórico de Natal com destaque para a poligonal de tombamento.



Figura 02: Linha do tempo Praça Augusto Severo.



Figura 03: Ficha de identificação da paisagem da Praça Augusto Severo.



Figura 04: Análise dos elementos estruturantes da praça.



Figura 05: Comparativo de traçados e composição vegetal em 2006 e 2026.

CÓDIGO: HS1015

AUTOR: MARIA SAFIRA ALVES SINEZIO

ORIENTADOR: MAISA FERNANDES DUTRA VELOSO

TÍTULO: Atualização das mídias do Grupo Projetar da UFRN

Resumo

Este relatório apresenta as principais ações desenvolvidas ao longo da execução do plano de trabalho intitulado “Atualização das mídias do Grupo Projetar da UFRN", sob a orientação da Profª. Drª. Maísa Veloso”. As atividades concentraram-se em dois eixos fundamentais: a atualização do site institucional do Grupo de Pesquisa e a Revista PROJETAR, periódico eletrônico quadrimestral voltado à publicação de artigos científicos nas áreas de Projeto e Percepção do Ambiente. O plano de trabalho teve como objetivos a inserção da bolsista no contexto da pesquisa acadêmica, o reconhecimento das potencialidades e limites dos sistemas utilizados pelo Grupo, a atualização periódica de suas ferramentas eletrônicas e análise do panorama da produção científica recente em periódicos na área de Arquitetura e Urbanismo. Dentre os resultados, destacam-se a participação parcial na organização e publicação do volume 10 (edição 30) e do volume 11 (edições 31 e 32) da Revista PROJETAR, a indexação dos artigos publicados na plataforma DOAJ, a manutenção do Banco de Dados Projedata, a divulgação de pesquisas e a atualização do site do Grupo cumprindo, assim, os objetivos propostos.

Palavras-chave: Arquitetura, Revista Eletrônica, Banco de dados, Biblioteca Virtual.

TITLE: Updating the Media Platforms of the UFRN Projetar Group

Abstract

This report presents the main activities carried out throughout the implementation of the work plan entitled “Updating the Media Platforms of the UFRN Projetar Group,” under the supervision of Professor Dr. Maísa Veloso. The activities focused on two fundamental areas: updating the institutional website of the Research Group and contributing to PROJETAR Journal, a four-monthly electronic journal dedicated to the publication of scientific articles in the fields of Architectural Design and Environmental Perception. The work plan aimed to integrate the scholarship student into the context of academic research, identify the potentialities and limitations of the systems used by the Group, periodically update its electronic tools, and analyze the recent landscape of scientific production in journals within the field of Architecture and Urbanism. Among the results achieved, noteworthy are the partial participation in the organization and publication of Volume 10 (Issue 30) and Volume 11 (Issues 31 and 32) of PROJETAR Journal, the

indexing of published articles on the DOAJ platform, the maintenance of the Projedata Database, the dissemination of research activities, and the updating of the Group's website, thereby fulfilling the proposed objectives.

Keywords: Architecture, Electronic Journal, Database, Virtual Library.

Introdução

O presente relatório apresenta as ações relacionadas àexecução do plano de trabalho "Atualização das mídias do Grupo Projetar da UFRN", desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa "A produção científica recente na área Arquitetura e Urbanismo no Brasil: uma leitura dos artigos publicados em periódicos", vinculado ao Departamento de Arquitetura da UFRN e sob a orientação da Prof.ª Drª. Maísa Fernandes Dutra Veloso.

O Grupo de Pesquisa PROJETAR está vinculado ao Centro de Tecnologia e direciona suas principais linhas de investigação para as áreas de Projeto de Arquitetura e Percepção do Ambiente. A denominação do grupo remete ao evento "PROJETAR – Seminário sobre Ensino e Pesquisa em Projeto de Arquitetura", realizado em Natal/RN em 2003, ano que também marcou a constituição do grupo de pesquisa.

Atualmente, o Grupo de Pesquisa é responsável pela manutenção de três importantes mídias eletrônicas voltadas à área de Projeto de Arquitetura: a Revista PROJETAR, o Banco de Dados PROJEDATA e o site institucional do Grupo. A revista, classificada como Qualis A2, constitui um periódico quadrimestral de acesso online, hospedado no Portal de Periódicos da UFRN (https://periodicos.ufrn.br/revprojetar/index).

A revista publica artigos científicos e resumos expandidos submetidos à avaliação por pares em sistema duplo-cego, distribuídos nas seções de Pesquisa, Ensino, Teoria e Conceito, Crítica e Práxis, além de reservar espaço para ensaios de pesquisadores de destaque na área. O periódico é operado por meio do software de código aberto Open Journal System (OJS/PKP), que gerencia todo o processo editorial, desde a submissão e avaliação até a publicação das edições.

A Revista PROJETAR encontra-se, até o momento, em sua 32ª edição, publicando em cada volume trabalhos acadêmicos submetidos à revisão por pares. Tanto os artigos individualmente quanto as edições completas recebem registro de DOI (Digital Object Identifier), assegurando sua identificação e rastreabilidade no meio científico.

O site do Grupo de Pesquisa PROJETAR (https://www.grupoprojetar.ct.ufrn.br/), hospedado em um sistema gratuito e de código aberto intitulado Joomla, constitui o espaço virtual destinado à divulgação de notícias e informações sobre as atividades do grupo, incluindo a promoção de encontros e rodas de conversa, a realização dos Seminários PROJETAR, evento hoje internacional criado pelo grupo, o lançamento de novas edições da revista, além de outras iniciativas vinculadas aos pesquisadores.

Os objetivos desta pesquisa consistiram inicialmente na inserção do bolsista no campo da investigação científica. Paralelamente, buscou-se examinar as potencialidades e limitações dos sistemas e softwares empregados nas pesquisas do Grupo, com ênfase no Open Journal System e no DSpace. O plano de atividades também contemplou a

atualização periódica dos meios eletrônicos do Grupo, incluindo a criação de novas publicações e a alimentação do banco de dados, além da colaboração na editoração final dos artigos e no design gráfico da Revista PROJETAR, bem como a análise crítica do cenário recente da pesquisa na área de AU no Brasil. Assim sendo, este relatório tem por finalidade expor as principais ações e resultados obtidos no âmbito da iniciação científica, além de indicar perspectivas para sua continuidade.

Metodologia

O percurso metodológico do plano de trabalho baseou-se, em grande medida, na continuidade das atividades já desenvolvidas no plano anterior. Nesse contexto, a bolsista atuou na revisão do material gráfico da Revista Projetar, além de colaborar na manutenção e atualização das mídias vinculadas ao Grupo de Pesquisa PROJETAR.

Paralelamente, a estudante, sob orientação da professora responsável, contribuiu para a inserção da Revista Projetar no Directory of Open Access Journals (DOAJ). Esse diretório constitui-se como uma plataforma de indexação e hospedagem de periódicos de acesso aberto, cujo conteúdo é gratuito e segue rigorosos critérios de qualidade, seja por meio do processo de revisão por pares, seja pelo controle editorial especializado.

Outra atividade desenvolvida consistiu na atualização e ampliação do acervo da Biblioteca Projedata, com a organização e inserção de artigos científicos publicados em periódicos brasileiros da área de Arquitetura e Urbanismo. Essa atividade integra o processo de desenvolvimento do projeto de pesquisa ao qual o presente plano de trabalho está vinculado, contribuindo para a sistematização e disponibilização de referências bibliográficas.

Resultados e Discussões

Conforme já destacado, o site do Grupo encontra-se atualmente hospedado em um sistema gratuito e de código aberto denominado Joomla. Trata-se de uma plataforma de gerenciamento de conteúdo que se distingue por facilitar a separação entre design, programação e material a ser publicado. Nesse sentido, o Joomla funciona como uma estrutura básica de site, equipada com recursos essenciais e que possibilita ampla personalização e gestão. Por meio dele, foi realizada a atualização do site do Grupo de Pesquisa PROJETAR, incluindo publicações que direcionam os visitantes para o portal da Revista Projetar.

Paralelamente à manutenção do site institucional, durante a vigência da bolsa também foi dada continuidade ao desenvolvimento dos projetos gráficos da Revista Projetar, classificada como Qualis A2. O periódico, de fluxo contínuo e publicação quadrimestral, recebe artigos científicos organizados em cinco seções: Ensino, Pesquisa, Teoria e

Conceito, Crítica e Práxis. Todos os manuscritos passam por avaliação duplo-cega e abordam temáticas relacionadas ao Projeto Arquitetônico e à Percepção do Ambiente.

No período analisado, foram lançadas três edições da Revista, correspondentes a setembro/2025, janeiro/2026 e maio/2026, que compõem os números 30, 31 e 32, respectivamente, disponíveis no Portal de Periódicos da UFRN (https://periodicos.ufrn.br/revprojetar/issue/archive).

A edição nº 30 (v.10 n.3), publicada em setembro de 2025, foi dedicada à Profa. Dra. Ruth Verde Zein (In memoriam), composta por 18 artigos distribuídos nas Seções Ensino, Crítica, Teoria e Conceito, Pesquisa e Práxis.

A edição nº 31 (v.11 n.1), lançada em janeiro de 2026, iniciou o 11º anos de atividade da revista, publicando treze artigos agrupados nas seções Ensaio, Cítica, Teoria e Conceito, Ensino e Pesquisa.

Já a edição nº 32 (v.11 n.2), publicada em maio de 2026, trouxe dezessete artigos com temáticas diversas, agrupados nas seções Crítica, Ensino, Pesquisa e Práxis.

As capas dessas três edições foram idealizadas conjuntamente pelos professores Verner Monteiro e Gleice Elali e pela bolsista, e produzidas no software Affinity. Atualmente, no mês de agosto, encontram-se em andamento os trabalhos de organização do próximo número, com previsão de publicação no Portal de Periódicos até o final de setembro.

Cabe destacar que todos os artigos e publicações da Revista Projetar foram indexados no Directory of Open Access Journals (DOAJ), diretório internacional de periódicos de acesso aberto reconhecido pela relevância e rigor de qualidade. Essa indexação amplia a visibilidade e facilita o acesso às produções do periódico em âmbito global, disponível pelo link: https://doaj.org/toc/2448-296X.

Conclusão

A partir das experiências apresentadas, verifica-se que os objetivos do plano de trabalho foram atingidos, uma vez que a bolsista pôde ser inserida no contexto da pesquisa científica, exercitando a análise das potencialidades e limitações dos sistemas adotados pelo Grupo Projetar, como o Open Journal System.

Além disso, garantiu-se a atualização regular dos meios eletrônicos do Grupo PROJETAR, bem como a publicação das edições quadrimestrais da Revista Projetar. Vale destacar que, para além da inserção de novas publicações, também houve a revisão e atualização dos dados referentes aos integrantes do Grupo disponibilizados no site institucional.

Assim, as ações desenvolvidas no âmbito do site e da Revista Projetar contribuíram para que a bolsista adquirisse conhecimentos relevantes, favorecendo a construção de uma

postura crítica diante da produção acadêmica de qualidade na área, além de ampliar seu domínio das ferramentas utilizadas no processo.

Registra-se, ainda, o agradecimento à professora orientadora Maísa Veloso, à professora Gleice Elali, ao professor Verner Monteiro e aos demais bolsistas do Grupo Projetar, cuja colaboração foi indispensável para a realização das atividades descritas.

Por fim, espera-se dar continuidade às atividades da bolsa de iniciação científica, ampliando o compromisso com a difusão do conhecimento e o acesso à informação sobre Projeto Arquitetônico e Percepção do Ambiente, tanto no meio acadêmico quanto em outros setores da sociedade, de maneira cada vez mais efetiva.

Referências

BURGHARDT, D.; HACKER, M. Informed Design: a contemporary approach to Design Pedagogy. Disponível em: https://www.hofstra.edu/pdf/academics/colleges/seas/ctl/ctl_informeddesign_003.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023.

CAPES. Documento de Área 2013, Arquitetura, Urbanismo e Design. Disponível em: http://capes.gov.br/images/stories/download/avaliacaotrienal/Docs_de_area/Arquitetura_Urbanismo_e_Design_doc_area_e_comiss%C3%A3o_16out.pdf.

CHUPIN, J-P. As três lógicas analógicas do projeto em Arquitetura: do impulso monumental à necessidade de pesquisa, passando pela inevitável questão da "ensinabilidade" da arquitetura. In: LARA, F.; MARQUES, S. (org.). PROJETAR: desafios e conquistas da pesquisa e do ensino de projeto. Rio de Janeiro: Editora Virtual Científica, 2003.

CROSS, N. Expertise in Design: an overview. Design Studies, v.25, p.427-441, 2004.

DARQ/UFRN. Disponível em: http://darq.ufrn.br/graduacao/. Acesso em: 09 jul. 2023.

EURAU'04. Journées européennes de la recherche architecturale et urbaine. La question doctorale. Anais... Marselha: ENSA, 2004.

GROAT, L.; WANG, D. Architectural Research Methods. New York: Wiley, 2013.

KOSKINEN, I.; ZIMMERMAN, J.; BINDER, T.; REDSTRÖM, J.; WENSVEEN, S. Design Research Through Practice: From the Lab, Field and Showroom. Waltham, MA, USA: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2011.

KOWALTOWSKI, D.; MOREIRA, D. As pesquisas sobre processos de projeto em arquitetura: argumentos para uma reflexão. Revista PROJETAR – Projeto e Percepção do Ambiente, v.1, n.1, p.42-52, nov. 2015.

LAWSON, B. Como arquitetos e designers pensam. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LAWSON, B. Design Research in Architecture: An Overview. Design Studies, v.36, n.1, p.125-130, jan. 2015.

LIMA, A. G. et al. Indicadores da Pesquisa Acadêmica em áreas de prática projetual. In: V PROJETAR, 2011, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: [s.n.], 2011. v.1, s/p.

MACWILLIAM, E.; TAYLOR, P. Im/material: challeging the new pedagogies of Instructional Design. Educational Researcher, v.27, n.8, p.29-35.

SANTOS Jr., W. R.; SOBRAL, J. E. C.; ELALI, G. V. M. A. Avaliação Quadrienal 2017-2021 - Relatório de Avaliação - Área de Arquitetura, Urbanismo e Design (Área 29). Brasília: CAPES, 2023. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/avaliacao/consultaFichaAvaliacao.jsf;jsessionid=u7GqkyC8wZPhd12eFJ0islIg.sucupira-205.

SYKES, C. Constructing a New Agenda for Architecture: Architectural Theory 1993-2009. Nova York: Princeton Architectural Press, 2011.

VELOSO, M.; MARQUES, S. A pesquisa como elo entre teoria e prática do projeto: alguns caminhos possíveis. Arquitextos, São Paulo, ano 8, n.088.8, Vitruvius, set. 2007. Disponível em: http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/08.088/211.

VELOSO, M.; SILVA, A. B. L.; LOBAO, R. S. A pesquisa na área de projeto de Arquitetura e Urbanismo no Brasil (2003-2015). In: VIII PROJETAR, 2017, Buenos Aires. Anais do VIII PROJETAR 2017. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2017.

Sites:

DOAJ: Disponível em: <https://doaj.org/>. Acesso em: 22 de agosto de 2025

JOOMLA: Disponível em: <https://www.joomla.org/>. Acesso em: 22 de agosto de 2025.

REVISTA PROJETAR: Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revprojetar>. Acesso em: 22 de agosto de 2025.

GRUPO PROJETAR: Disponível em: <https://grupoprojetar.ct.ufrn.br/>. Acesso em: 22 de agosto de 2025.

CÓDIGO: HS1026

AUTOR: GABRIEL GIOVANI MENDES

ORIENTADOR: CLARA OVÍDIO DE MEDEIROS RODRIGUES

TÍTULO: Acompanhamento de processos projetuais com metas de resiliência em contextos de climas futuros para as cidades de Natal, Caicó e Macau-RN

Resumo

A urgência climática exige que a arquitetura atue estrategicamente na mitigação e adaptação, dado que o setor de edificações responde por 42% das emissões globais. Integrar metas de resiliência e simulação de desempenho (BPS) nas etapas preliminares é vital, mas essas ferramentas ainda não são usadas de maneira que aproveite todo o seu potencial. Diante disso, este trabalho investiga um experimento pedagógico no qual estudantes projetaram uma galeria comercial para o clima semiárido de Caicó (RN), testando cenários futuros de aquecimento para 2050 e 2080 com suporte de especialistas. A análise revelou como conceitos de flexibilidade, conforto, bem-estar, desconstrução e soluções baseadas na natureza se materializaram nas propostas dos alunos. Os discentes adotaram soluções que contemplam a resiliência e conseguiram atingir as metas, contudo, surgiram entraves didáticos como a severa limitação de tempo e a complexidade dos softwares, o que levou à centralização do trabalho e ao uso da simulação como validação estática de metas, e não como meio ativo de testagem e de redução de incertezas criativas. Conclui-se que, para incorporar a resiliência à rotina projetual, o ensino deve estender o tempo de contato com essas tecnologias, integrando-as de forma dinâmica ao diálogo crítico do projeto.

Palavras-chave: Resiliência. BPS. Emergência climática. Processo projetual.

TITLE: Monitoring of design process with resilience goals in contexts of future climates for the cities of Natal, Caicó and Macau-RN

Abstract

The climate emergency demands that architecture play a strategic role in mitigation and adaptation, given that the building sector accounts for 42% of global emissions. Integrating resilience goals and building performance simulation (BPS) into the preliminary design stages is vital, yet these tools are not currently utilized to their full potential. Against this backdrop, this study examines a pedagogical experiment in which students designed a commercial gallery for the semi-arid climate of Caicó (RN), testing future warming scenarios for 2050 and 2080 with expert support. The analysis revealed how concepts such as flexibility, comfort, well-being, deconstruction, and nature-based solutions materialized in the students' proposals. While the students adopted resilience-

oriented solutions and successfully met their targets, pedagogical obstacles—such as severe time constraints and software complexity—arose. These issues led to a centralized workflow and the use of simulation merely for static target validation, rather than as an active means of testing and reducing creative uncertainty. The study concludes that, to embed resilience into the design process, education must extend the time spent engaging with these technologies, integrating them dynamically into the critical design dialogue.

Keywords: Resilience. BPS. Architecture teaching. Design process. Climate change

Introdução

A intensificação das mudanças climáticas tem aumentado a ocorrência e a magnitude de eventos naturais capazes de comprometer o funcionamento das cidades e das edificações, como enchentes, ondas de calor, que podem causar interrupções no fornecimento de energia (Attia et al., 2021; IPCC, 2023). Nesse contexto, a arquitetura assume papel estratégico não apenas na redução dos impactos ambientais associados à construção e à operação dos edifícios, mas também na capacidade de antecipar, absorver, adaptar-se e responder a condições adversas. Considerando que o setor de edificações responde por grande parte das emissões globais relacionadas à poluentes, compondo cerca de 42%, segundo a IEA (2023, apud Bethônico, 2024). As decisões tomadas ao longo do processo de projeto possuem implicações que extrapolam o desempenho imediato da edificação e se estendem por toda a sua vida útil. A resiliência, portanto, apresenta-se como uma dimensão fundamental da prática arquitetônica diante de um cenário marcado por incertezas ambientais, sociais e energéticas.

Embora a capacidade de responder às transformações e aos eventos adversos esteja intrinsecamente relacionada ao fazer arquitetônico, a abordagem da resiliência ainda encontra espaço limitado no cotidiano da prática de arquitetura. Incorporar essa perspectiva à formação profissional implica ampliar a compreensão do projeto para além da resolução de requisitos funcionais e formais, considerando também a capacidade dos espaços construídos de manter ou recuperar seu desempenho diante de perturbações e mudanças. Nesse sentido, discutir resiliência no ensino de arquitetura pode aproximar os estudantes de questões contemporâneas relacionadas às mudanças climáticas, ao mesmo tempo em que contribui para a construção de uma postura projetual capaz de lidar com cenários futuros incertos.

Nesse contexto, a simulação de performance de edifícios entra como um dos fatores principais para entender o comportamento de um projeto no futuro, considerando o consumo e necessidades energéticas do edifício. Entretanto, a conciliação entre projeto e simulação de performance ainda é algo pouco visto na prática da profissão. É necessário projetistas com bom conhecimento na área, ou um profissional especializado com a função de modelar e simular o edifício. Apesar do potencial da simulação, que permite antever o resultado antes da construção, muitas vezes ela é feita como uma verificação final da performance do projeto, não sendo considerado durante a etapa de concepção (de Wilde, et al. 2024). Para aproveitar esses estudos na concepção de projeto é necessário compreender o processo de projeto.

O pensamento projetual aborda problemas e soluções de forma integrada, utilizando

desenhos, esboços e modelos para explorar possibilidades e materializar ideias (Cross, 2011; Kowaltowski et al., 2006). Esses recursos favorecem a crítica, a experimentação, a formulação de hipóteses e a análise de alternativas, contribuindo para a reflexão-na-ação (Cross, 2011; Kowaltowski et al., 2006; Schön, 2000). Nesse processo, a simulação de performance pode auxiliar na compreensão do comportamento futuro da edificação, especialmente quanto ao consumo e às necessidades energéticas. Contudo, sua integração ao projeto ainda é limitada, sendo muitas vezes utilizada apenas como verificação final (de Wilde et al., 2024). Sua incorporação desde as etapas iniciais pode ampliar a avaliação das alternativas e contribuir para a redução de incertezas diante de problemas complexos (Lebahar, 1999).

A aplicação de resiliência e integração com modelagem de edifícios e simulação ainda não está muito difundida na profissão da arquitetura, portanto este artigo tem como objetivo investigar as ações projetuais e tomada de decisão em projetos com metas de resiliência, e como a simulação de performance do BIM pode impactar nas decisões dos projetistas quando colaboram com especialistas, baseando-se em um experimento em sala de aula com alunos de arquitetura,

Metodologia

Essa pesquisa utilizou dos materiais e resultados obtidos de uma disciplina optativa ministrada no curso de Arquitetura e Urbanismo da UFRN, cujo tema era resiliência na arquitetura e projeto colaborativo com auxílio de profissionais especializados. A dinâmica da disciplina envolvia os alunos realizarem projetos, abordando temáticas relacionadas à resiliência com auxílio de especialistas, e apresentarem seus resultados no fim do processo. Os materiais analisados na pesquisa correspondem ao projeto desenvolvido pelos estudantes durante a segunda e terceira unidades da disciplina. O tempo de desenvolvimento disponibilizado para os alunos foi de Maio a Julho de 2025. Todos os procedimentos, instrumentos e processos utilizados nesta pesquisa foram aprovados pelo comitê de ética da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, conforme o parecer 7.3.67.234, em Janeiro de 2025. Além disso, os discentes que participaram da pesquisa assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, que permitiu o uso da gravação de imagem e voz dos participantes, além de todos os materiais desenvolvidos.

As aulas foram gravadas, e posteriormente transcritas, para serem utilizadas junto aos outros materiais obtidos feitos pelos estudantes para análises, sendo eles relatórios de projeto, desenhos, e entrevistas. As perguntas realizadas na entrevista foram sobre as informações sobre o projeto, sobre a resiliência, sobre a integração entre os membros da equipe, sobre o processo, e sobre a troca de informações, e estão disponíveis de maneira completa nas figuras 01 e 02. As transcrições foram codificadas no QDA Miner Lite (Provalis, 2011), baseando-se em diretrizes de resiliência ensinadas na disciplina, e depois foi verificada a ocorrência e contexto da ocorrência desses códigos durante o processo projetual dos estudantes.

Os códigos foram pensados baseando-se em conceitos-chave da resiliência, e temas de outras aulas, que foram NbS (Nature-based Solutions), desconstrução na arquitetura, bem-estar, conforto ambiental, flexibilidade, e adequação. Os conceitos de bem-estar,

adequação ambiental, conforto ambiental e flexibilidade foram extraídos da produção de Villa e Oliveira (2021), sobre resiliência em HIS.

É válido destacar que este artigo compreende à parcela da pesquisa relacionada à disciplina sobre metas de resiliência na arquitetura, que aborda especificamente a cidade de Caicó-RN e seus climas futuros.

Resultados e Discussões

A resiliência pode ser entendida de diversas maneiras, Holling (1973, 1996) define resiliência em duas áreas da pesquisa: na ecologia é descrita como a capacidade de um ecossistema se recuperar e atingir equilíbrio após um choque, mesmo que em um nível inferior ao passado; já na engenharia, é a "rapidez com que um sistema que foi deslocado do equilíbrio por uma perturbação ou choque retorna a esse estado de equilíbrio e continua atuando". Já para a American Institutes of Architects (2018), a resiliência é entendida como "a capacidade de preparar e planejar para, absorver, recuperar-se e adaptar-se a eventos adversos". Todas essas definições de resiliência podem ser sobrepostas para se definir a resiliência na arquitetura, porém Villa e Oliveira (2021) vão um passo além e categorizam a resiliência em sete conceitos: conforto ambiental; adequação ambiental; flexibilidade, acessibilidade, resistência, bem-estar e engajamento. Para esta pesquisa, foi identificado como mais relevantes os tópicos de conforto ambiental, adequação ambiental, bem-estar e flexibilidade, devido à proximidade que esses tópicos têm com o que foi desenvolvido em sala de aula, e com o que foi visto com mais frequência como relevante durante o processo de projeto dos alunos.

As autoras elaboram a ideia de flexibilidade como a possibilidade de modificar a configuração dos espaços funcionais, a facilidade de adaptação dos espaços com poucas intervenções construtivas; capacidade dos ambientes de acomodar diferentes funções e atividades; e flexibilidade para atender a diferentes perfis de ocupantes. Já o conceito de bem-estar está relacionado ao modo do projeto providenciar interações sociais, estímulo do aprendizado, contemplação da paisagem, aumento de atividades físicas, e altruísmo. O conforto ambiental é explicado como a boa performance dos elementos construtivos, otimização de recursos naturais e eficiência energética, e por último, a adequação ambiental é entendida como a adoção de materiais e técnicas sustentáveis, boa utilização dos recursos como água e energia, e bom manejo dos resíduos.

Esses conceitos foram utilizados para codificar os materiais e identificar possíveis padrões de projeto nos alunos projetistas. Além dos códigos relacionados à resiliência e os conceitos das autoras Villa e Oliveira, outros códigos relacionados à temas de outras aulas, e dificuldades na concepção projetual também foram criados para ter uma visão mais ampla do processo de projeto dos alunos. A produção dos estudantes coletada e utilizada para este artigo se refere às aulas de atelier e charretes com especialistas, da segunda e terceira unidades da disciplina. Além disso, algumas das aulas foram destinadas à apresentação de uma ferramenta de simulação de performance (Santos, et al., 2023), que utiliza de metamodelos baseados no INI-C para avaliação da

performance dos materiais e decisões projetuais escolhidos, juntamente com a projeção dessas decisões em climas futuros.

O projeto solicitado aos estudantes foi feito em Caicó-RN, e foi pedido um projeto de galeria comercial, com a aplicação das diretrizes ensinadas em sala de aula. O terreno de intervenção é o lote na esquina da Av. Coronel Martiniano, com a Rua Martinho Elpídio, com cerca de 1.700 m² (Fig. 03). A turma foi dividida em 2 grupos, com 3 e 4 integrantes, os quais serão referidos neste artigo como Grupo 01 o grupo com 3 integrantes, e Grupo 02 o grupo com 4 integrantes.

O Grupo 01, composto por estudantes de 8º e 9º período, apresentou um projeto de 4 blocos de galerias comerciais, de 2 tipologias diferentes, que abraçam um pátio central de convivência e contemplação. O projeto utiliza uma modulação estrutural de 4x4 metros, com paredes de drywall, com a lógica de que cada módulo seja independente e possa ser alugado individualmente, ou possam ser alugados múltiplos desses módulos e serem agrupados para fazer um espaço maior. As 2 tipologias se diferem tanto em uso quanto forma, uma das tipologias teria pé direito duplo, para lojas maiores, com possibilidade de mezanino; e a outra tipologia seria um pé direito simples, com os usos que necessitam de água, como restaurantes, lanchonetes e pet shops. Além disso, o grupo conseguiu estimar o desempenho do edifício e a relação consumo/produção de energia elétrica do projeto, conseguindo alcançar autossuficiência com a instalação de placas fotovoltaicas na cobertura. As estratégias projetuais referentes à cada tópico da resiliência foram compiladas na Tabela 01, e separadas por tema e como foram aplicadas (Figuras 04 à 08).

Em entrevistas posteriores à disciplina, os participantes revelam que o foco do projeto era atender as metas de resiliência em si, então foi diminuído o número de lojas em favor do melhor desempenho resiliente da edificação. O paisagismo e uso de vegetação também foi algo essencial para melhorar o conforto do projeto, visto o clima quente e seco da região, que pode ser mitigado com uso de arborização e espelhos d'água, juntamente com o uso de materiais que façam sentido com a região na questão bioclimática. Alguns dos focos do projeto não puderam ser alcançados, como a desmontabilidade da edificação, em que eles substituíram uma estrutura desmontável pela utilização de tijolo solo e cimento, mostrando que a prioridade era atender uma meta de eficiência e adequação, e as maiores dificuldades encontradas foram a falta de tempo, devido ao baixo número de encontros, além de dificuldades técnicas com os aplicativos utilizados, e o BIM.

Já o Grupo 02, composto por alunos do 5º, 6º e 8º período, propôs uma galeria composta por dois volumes, separados por um pátio central, com áreas verdes circundando as construções, e uma área multiuso em espaço aberto. As edificações seriam feitas em paredes espessas de tijolo ecológico na parte externa, visando diminuir o impacto ambiental e melhorar a inércia térmica das paredes, e as paredes internas seriam feitas de drywall, podendo ser ajustada para compor lojas com múltiplos módulos. A cada 2 módulos foi posicionada uma parede estrutural contendo tubulação hidráulica, garantindo que todas as lojas possam ter áreas molhadas, como lanchonetes e restaurantes. O pátio foi considerado como uma área de convivência e melhoramento do microclima do projeto, contendo vegetação e espelho d'água para umidificação do ar. Além do espelho d'água, o grupo também considerou um telhado verde, tanto para a melhoria da umidade do ar, quanto como estratégia de resiliência com base na

Infraestrutura Verde. Assim como o outro grupo, as informações também foram compiladas na Tabela 02, com suas aplicações (Figuras 09 à 15).

O grupo apresentou maior avanço na questão do pensamento de climas futuros, que foi um dos temas apresentados em sala, e foi algo que o outro grupo não apresentou, conseguindo apresentar simulações para os cenários de climas futuros providenciados, e mesmo assim conseguindo atingir bons resultados (o resultado em azul sendo o mais eficiente). Como maiores dificuldades, o grupo apresentou divergências na coordenação e alinhamento da equipe, que não foi apresentado como dificuldade no outro grupo. Também foi relatado pelos alunos a dificuldade de propor um projeto para uma zona bioclimática diferente da habitual, que estão mais acostumados com o clima litorâneo de Natal-RN. Além disso, a priorização do atendimento às metas de resiliência resultou em dificuldades em outras áreas do projeto, como a conciliação de um telhado verde, que adiciona um carregamento massivo na cobertura, e uma estrutura flexível que pudesse ser mudada livremente.

Ambos os grupos apresentaram como dificuldades a conciliação do tempo da disciplina com as outras obrigações do período, como as disciplinas obrigatórias e estágio. Além disso, foi percebido uma falta de afinidade ou compreensão total das ferramentas disponibilizadas, como o aplicativo de simulação de performance do edifício. Isso pode ter ocorrido devido ao pouco tempo de contato com o especialista — que só acontecia durante o horário de poucas aulas — ou devido à um mal entendimento do uso do aplicativo. Foi percebido que um dos grupos estava mais fixado na ideia de atingir uma boa performance do que testar os materiais e as possibilidades de projeto, percebendo o aplicativo como uma ferramenta de definição do projeto, do que uma ferramenta de testagem e criação.

Conclusão

A integração de metas de resiliência e simulação de desempenho energético (BPS) desde as fases iniciais do projeto arquitetônico se apresenta como uma boa alternativa para mitigar os impactos das mudanças climáticas provocadas pela edificação, especialmente considerando que o setor de edificações é responsável por cerca de 42% das emissões mundiais. A análise dos trabalhos práticos desenvolvidos demonstrou a viabilidade de articular conceitos de flexibilidade, adequação ambiental, bem-estar e conforto ambiental para responder às demandas severas do clima semiárido. Soluções como a modulação e vedações internas leves; a centralização de núcleos hidráulicos rígidos; a substituição de materiais tradicionais por materiais com menor impacto; o uso de soluções baseadas na natureza (NbS), e a busca pela autossuficiência energética ativa por meio de geração de energia, ilustram o potencial do pensamento projetual de gerar respostas adaptativas e integradas a cenários futuros de aquecimento .

Por outro lado, o processo experimental evidenciou obstáculos pedagógicos e operacionais importantes que precisam ser considerados na formação em arquitetura. A escassez de tempo, somada à sobrecarga típica de outras demandas acadêmicas obrigatórias, limitou a capacidade de aprofundamento das investigações e a maturação das soluções construtivas propostas pelas equipes. Além disso, a complexidade técnica

dos softwares de simulação e o formato restrito de suporte especializado geraram dificuldades de interpretação e centralização do trabalho nos estudantes com maior afinidade digital. Observou-se, de forma crítica, uma tendência de os alunos enxergarem o aplicativo de simulação como uma ferramenta de definição final e estática de conformidade de desempenho, em vez de explorá-lo como um meio dinâmico de testagem e formulação de hipóteses.

Para que a resiliência climática seja incorporada à prática projetual cotidiana, é necessário que os modelos de ensino estendam o tempo dedicado a essas ferramentas e orientem os futuros profissionais a utilizarem a simulação não como uma barreira técnica de verificação, mas como parte integrante do diálogo crítico e da redução de incertezas do processo criativo, e a experimentação em sala de aula indicou que o processo projetual colaborativo entre projetistas e profissionais especializados permite que o projeto se desenvolva e que os projetistas explorem soluções diferentes do convencional da arquitetura.

Por fim, é importante destacar que essa pesquisa se limitou à um pequeno experimento com 7 integrantes em uma sala de aula, uma amostra muito pequena, portanto os resultados ainda são muito incipientes. Portanto, expandir essa pesquisa para além de uma sala de aula, seja com mais alunos, ou entrevistando profissionais da arquitetura envolvidos com simulação de performance ou metas de resiliência, pode trazer diferentes resultados daqueles vistos nessa experiência.

Referências

ATTIA, Shady, et al. **Resilient cooling of buildings to protect against heat waves and power outages: Key concepts and definition**. Energy and Buildings. v. 239, maio 2021, p. 110869. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110869.

BETHÔNICO, Thiago. **Autor(a): Thiago Bethônico** | Folha. Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/autores/thiago-bethonico.shtml. Acesso em: 3 maio 2025.

CROSS, N. **Design Thinking: Understanding how designers think and work**. London/New York: Bloomsbury Academic, 2011.

Provalis Research: **QDA Miner: qualitative data analysis software**, (2011).

Oliveira, Melina, Villa, Simone. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E COMPORTAMENTO CONSCIENTE NA RESILIÊNCIA EM HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2021, Londrina. **Anais** [...]. Recife: Even3, 2021. DOI: 10.29327/sbqp2021.438078

HOLLING, C. S. **Resilience and stability of ecological systems**. Annual Review of Ecology and Systematics. v. 4, n. 1, p. 1-23, 1973.

HOLLING, C. S. **Engineering resilience versus ecological resilience**. In: SCHULZE, Peter C. (Ed.). *Engineering within ecological constraints*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1996. p. 31–43.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023: synthesis report**. Genebra: S.N., 2023.

KOWALTOWSKI, D. et al. **Reflexão sobre metodologias de projeto arquitetônico**. Ambiente Construído. v. 6, n. 2, p. 12, abr./jun. 2006.

LEBAHAR, J. C. **Analyse congnitive de la conception et de sa pédagogie**. In: Approche didactique de l'enseignement du projet en architecture. Marseille: École d'Architecture de Marseille-Luminy, 1999.

SANTOS, A. C. S., RODRIGUES, C. O. M., PEDRINI, A. **A web dashboard to support early design decisions to meet energy goals**. In: Conference of IBPSA, 18, 2023, Shanghai, China, **Anais** [...], 2023. p. 1772-1778.

SCHÖN, D. A. **Educando o profissional reflexivo**: um novo design para o ensino e a aprendizagem. Porto Alegre: Artmed, 2000.

de WILDE, P., BLEIL DE SOUZA, C.: **Overcoming fixation**: Shaping BPS to fit into design practice. Build Simul. 17, 1037–1041 (2024). https://doi.org/10.1007/s12273-024-1146-1

Anexos



Tabela do Grupo 01



Tabela do Grupo 02



Figura 01: Primeira parte do guia de entrevistas



Figura 02: Segunda parte do guia de entrevistas



Figura 03: Terreno do projeto



Figura 04: Modulação e possibilidades de configuração das lojas



Figura 05: Projeto inicial, considerando blocos, átrio, estacionamento e caminhos



Figura 06: Definição dos blocos, aqueles marcados em verde teriam pé direito duplo.



Figura 07: Simulação de desempenho utilizando o INI-C;



Figura 08: Simulação de produção de energia solar por ano.



Figura 09: Modulação das lojas e materiais de vedação.



Figura 10: Implantação do projeto, com pátio no centro;



Figura 11: Simulação de geração de energia;



Figura 12: Simulação do desempenho do edifício;



Figura 13: Simulação do desempenho em 2050;



Figura 14: Simulação do desempenho em 2080;



Figura 15: Aplicação de telhado verde, com especificação.

CÓDIGO: HS1126

AUTOR: JESSICA MIKAELLY DA SILVA GOMES

ORIENTADOR: JOSE CLEWTON DO NASCIMENTO

TÍTULO: Diretrizes de Normatização do IPHAN e seus Reflexos: análise comparativa da normatização em Icó/CE, Areia/PB, Natal/RN e Olinda/PE

Resumo

Este estudo analisa as diretrizes de normatização do IPHAN aplicadas a sítios históricos brasileiros, no projeto "Reabilitação em Áreas de Valor Patrimonial", do grupo de pesquisa Morfologia e Usos da Arquitetura (MUSA/UFRN). O debate sobre patrimônio tem deixado de lado a ideia de "cidade-monumento" e caminhado para a de "cidade-documento", ampliando o entendimento sobre patrimônio e abrindo espaço para sítios de menor porte, enquadrados nas tipologias de "patrimônio modesto" discutidas pelo ICOMOS, cujos valores vêm das dinâmicas cotidianas da comunidade local. Nesta etapa, o recorte concentra-se nos percursos normativos de Icó (CE), Sobral (CE) e Areia (PB), somados a um estudo preliminar de Assú (RN), estudo vinculado a um programa de mestrado no PPGAU/UFRN, apoiado em mapeamentos feitos em QGIS. Assú, diferente dos demais, não tem sítio histórico tombado pelo IPHAN. A escolha se justifica pela pouca atenção dada a esses núcleos, comparados a centros maiores, como Natal (RN) e Olinda (PE), que ficam para etapas posteriores. A pesquisa é bibliográfica e documental, com levantamento no acervo do MUSA/UFRN e em fontes institucionais, complementado por visitas técnicas quando possível. Ao final, será possível entender como cada percurso normativo incorporou o zoneamento patrimonial flexível e a pactuação de níveis diferenciados de proteção, contribuindo para o debate sobre a normatização em sítios de menor visibilidade no país.

Palavras-chave: Palavras-chave: patrimônio cultural-edificado, normatização, sítios hi

TITLE: IPHAN Regulatory Guidelines and Their Impacts: A Comparative Analysis of Heritage Regulation in Icó/CE, Areia/PB, Natal/RN, and Olinda/PE

Abstract

This study examines the heritage regulation guidelines set by IPHAN applied to Brazilian historic sites, within the project "Rehabilitation in Areas of Heritage Value," developed by the research group Morfologia e Usos da Arquitetura (MUSA/UFRN). The debate on heritage has moved away from the idea of a "monument-city" and shifted toward that of a "document-city," broadening the understanding of heritage and making room for smaller sites, framed within the "modest heritage" categories discussed by ICOMOS, whose values come from the everyday dynamics of the local community. At this stage, the study focuses on the regulatory paths of Icó (CE), Sobral (CE), and Areia (PB), together with a preliminary study of Assú (RN), a study linked to a master's program at PPGAU/UFRN, supported by mapping done in QGIS. Assú, unlike the others, has no historic site listed by IPHAN. This choice is justified by the limited attention given to these towns, compared to larger centers such as Natal (RN) and Olinda (PE), which are left for later stages. The research is bibliographic and documentary, drawing on the MUSA/UFRN archive and institutional sources, complemented by field visits when possible. In the end, it will be possible to understand how each regulatory path incorporated flexible heritage zoning and the agreement on different levels of protection, contributing to the debate on heritage regulation in less visible sites across the country

Keywords: Key words: built cultural heritage, normatization, historic sites, Iph

Introdução

Nas últimas décadas, o debate sobre a preservação do patrimônio urbano vem passando por uma transição que desloca a noção clássica de "cidade-monumento" em direção ao conceito de "cidade-documento" (SANT'ANNA, 2014), o que amplia a compreensão sobre o que pode ser considerado patrimônio. Nesse cenário, ganham espaço os sítios históricos de menor porte no interior do país, tecidos urbanos associados às tipologias de "patrimônio modesto" ou não monumental discutidas pelo Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (ICOMOS), cujos valores emanam das vivências e dinâmicas internas da própria comunidade local (OLIVEIRA, 2020).

Em resposta a essas questões, o IPHAN vem instituindo, nos últimos vinte anos, portarias de normatização voltadas a núcleos históricos sem tombamento federal formal, buscando adequar a proteção patrimonial às particularidades de cada sítio. Mais recentemente, o órgão, em parceria com a Universidade de Brasília (UnB), editou em 2025 o Manual de Orientações para Preservação e a Matriz de Referência para Normas de Preservação, instrumentos que atualizam a etapa de "Leitura Inicial" e o zoneamento patrimonial aplicável a esses contextos.

A salvaguarda do patrimônio cultural-edificado em cidades de menor porte é fundamental para a manutenção da identidade coletiva e do sentido de pertencimento (HALBWACHS, 1990), mesmo que esses acervos enfrentem riscos de descaracterização por causa do crescimento urbano contemporâneo e da falta de instrumentos de planejamento e conservação eficazes (CASTRIOTA, 2009; CHOAY, 2006).

O presente estudo dá continuidade às investigações do Grupo de Pesquisa Morfologia e Usos da Arquitetura (MUSA/UFRN), no âmbito do projeto "Reabilitação em Áreas de

Valor Patrimonial: valorização do lugar? " Análises de programas e ações à luz de casos brasileiros e portugueses". Nas etapas anteriores, a investigação tratou de programas de reabilitação urbana em cidades brasileiras e portuguesas, com destaque para Natal (RN) e Torres Vedras, em Portugal. Nesta fase, o recorte temático passa a ser os percursos de normatização do IPHAN em sítios históricos brasileiros de menor porte, dentro do plano de trabalho "Diretrizes de Normatização do IPHAN e seus Reflexos: análise comparativa da normatização em Icó/CE, Areia/PB, Natal/RN e Olinda/PE". Os objetivos específicos são: 1) discutir a transição de "cidade-monumento" para "cidade-documento" e sua relação com o "patrimônio modesto"; 2) analisar as portarias de normatização instituídas pelo IPHAN para os núcleos estudados; 3) identificar como cada percurso normativo incorporou o zoneamento patrimonial e a pactuação de níveis diferenciados de proteção; 4) sistematizar avanços e limites dessas práticas em sítios de menor visibilidade no país.

O estudo se justifica, primeiro, porque esses sítios são pouco discutidos nas pesquisas sobre normatização patrimonial, se comparados a centros de maior porte; segundo, pela necessidade de entender processos normativos que, por não envolverem tombamento federal, seguem lógicas próprias em cada núcleo; e, por fim, pela contribuição que traz aos estudos sobre o tema e à formulação de políticas públicas de preservação mais adequadas a essas realidades.

O universo empírico compreende os percursos normativos de Icó (CE), Sobral (CE) e Areia (PB), somados a um estudo preliminar do Açu (RN), apoiado em mapeamentos em QGIS. Os casos de Natal (RN) e Olinda (PE), também previstos no plano de trabalho, ficam para etapas posteriores.

A seguir, apresentam-se os procedimentos metodológicos. A seção de Resultados e Discussões trata primeiro da ampliação conceitual do patrimônio rumo à "cidade-documento" e, em seguida, aprofunda a análise dos percursos normativos de Icó, Sobral e Areia à luz das diretrizes recentes do IPHAN.

Metodologia

A estrutura metodológica deste estudo segue quatro etapas: 1) revisão teórica dos conceitos de patrimônio cultural, conservação integrada e normatização de sítios históricos; 2) levantamento e sistematização dos dados documentais sobre os processos de tombamento e normatização de Icó, Sobral e Areia; 3) organização e análise crítica das informações coletadas, com a construção de um quadro comparativo; e 4) estudo complementar do Açu, com produção de mapeamentos em QGIS.

A pesquisa tem caráter qualitativo, de natureza bibliográfica e documental, desenvolvida a partir do acervo do MUSA/UFRN e de fontes complementares, como livros, artigos de periódicos, portarias, estudos de tombamento e materiais técnicos disponíveis em plataformas como a Biblioteca Nacional Digital e o Internet Archive Scholar.

A revisão teórica partiu dos conceitos de patrimônio cultural, conservação integrada e normatização de sítios históricos, com ênfase na leitura das metodologias empregadas pelo IPHAN na elaboração de normativas de preservação, incluindo a Matriz de Referência atualmente em vigor. Essa etapa apoiou-se em autores como Fonseca (2005), Castriota (2009), Lacerda e Zanchetti (2012) e Sant'Anna (2014), além das publicações técnicas do próprio IPHAN.

Na etapa seguinte, foram levantados e sistematizados os dados documentais sobre os processos de tombamento e normatização de Icó e Areia, cidades históricas de pequeno porte selecionadas para esta fase da pesquisa. Deu-se atenção especial aos estudos de tombamento, portarias e demais instrumentos normativos que embasaram a proteção de cada sítio, buscando identificar os valores culturais reconhecidos e os critérios de proteção estabelecidos em cada caso, além do modo como leitura do território, participação social e pactuação foram ou não incorporadas ao processo. Os casos de Natal e Olinda, também previstos no plano de trabalho, não entraram nesta etapa: optou-se por concentrar a pesquisa primeiro nos sítios de pequeno porte, deixando os demais para fases futuras.

As informações coletadas foram organizadas e analisadas criticamente, o que resultou num quadro comparativo entre os diferentes modelos de normatização, mostrando continuidades e rupturas nas abordagens de preservação ao longo das últimas três décadas.

Iniciaram-se os estudos de caso do município de Assú, localizado no interior do Rio Grande do Norte, reconhecido como o primeiro núcleo de ocupação colonial do interior do estado e detentor de um relevante acervo patrimonial edificado. Este estudo integra uma pesquisa de mestrado desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da UFRN, tendo as pesquisas sobre Icó e Areia servido de referência norteadora para sua condução.

Resultados e Discussões

PANORAMA CONCEITUAL DA NORMATIZAÇÃO PATRIMONIAL

Os levantamentos feitos até aqui mostram diferenças importantes entre os processos de normatização das cidades analisadas, o que reflete o próprio amadurecimento metodológico do IPHAN ao longo das últimas décadas. Como já discutido na revisão teórica, o conceito de patrimônio se ampliou aos poucos a partir das décadas de 1960 e 1970, sob influência da Carta de Veneza e da Declaração de Amsterdã, deixando de se restringir a bens isolados para incorporar uma leitura mais territorial e participativa (CASTRIOTA, 2009). É esse pano de fundo conceitual que orienta a comparação, nas seções seguintes, entre a aplicação prática das normativas em Icó (CE), Sobral (CE) e Areia (PB).

A NORMATIZAÇÃO EM ICÓ (CE)

O tombamento de Icó foi concluído em 1998, seguindo os critérios do IPHAN e concentrando a proteção no núcleo urbano da cidade. Segundo Nascimento (2013), o estudo de tombamento tentou valorizar a riqueza arquitetônica e urbanística do lugar, mas ainda tratava o sítio mais como um monumento do que como uma cidade viva, deixando de lado as transformações urbanas recentes e as dinâmicas sociais do dia a dia.

A aplicação das políticas de preservação também esbarrou em problemas práticos. Nascimento (2013) mostra que a pobreza da população dificultava contratar profissionais qualificados para as reformas exigidas pela norma. Isso, somado à falta de mão de obra especializada na cidade, abriu espaço para intervenções irregulares e fez o IPHAN ser visto pelos moradores como um órgão autoritário, que limitava o direito de propriedade. Essa tensão entre a norma técnica e a vida cotidiana também ocorreu na reforma do Mercado Público: a padronização imposta acabou com a prática comercial tradicional feita dentro do prédio, gerando insatisfação entre os comerciantes.

A NORMATIZAÇÃO EM SOBRAL (CE)

O tombamento de Sobral, em 1999, trouxe uma novidade: usou análise sequencial e valores topoceptivos, incluindo no perímetro protegido o rio Acaraú e a Serra da Meruoca. Isso ampliou a área tombada para cerca de 1.200 imóveis (NASCIMENTO, 2013). Essa mudança, porém, gerou divergências dentro da própria equipe técnica do IPHAN, dividida entre uma leitura mais tradicional e as novas propostas territoriais.

Na gestão local, a Lei Municipal nº 2.291, de 2022, avançou na normatização ao criar o Conselho Municipal do Patrimônio Cultural (COMPAC), com participação deliberativa da sociedade civil, e ao instituir o registro de bens imateriais em quatro livros, um passo importante para a gestão compartilhada do patrimônio. Ainda assim, a aplicação das normas continuou gerando conflitos: na requalificação da margem do rio Acaraú, o IPHAN reprovou intervenções nas fachadas por considerá-las pastiche e falso histórico, enquanto os moradores seguiam ressignificando o espaço público no cotidiano, usando-o como varal, campo de futebol e área de lazer (NASCIMENTO, 2013). O caso de Sobral mostra que avanços institucionais, por si só, não bastam para conciliar a norma com a dinâmica local.

A NORMATIZAÇÃO EM AREIA (PB)

O tombamento do centro histórico de Areia foi formalizado pela Portaria IPHAN nº 297/2010. A portaria trouxe normas rígidas para preservar o núcleo urbano e transformou as encostas em áreas verdes protegidas contra novos loteamentos. Porém, a lei ficou voltada quase só para a parte urbana construída, tratando a paisagem rural como uma simples "moldura" da cidade. Segundo Ferreira (2010), essa é a demonstração do "descuido de se tombar", já que os engenhos de cachaça e rapadura foram fundamentais para a formação histórica e econômica do município, representando um patrimônio cultural tão importante quanto o núcleo urbano.

A Portaria de 2010 sugere a criação de uma Câmara Consultiva Local, mas isso não foi suficiente para proteger o patrimônio rural. O caso de Areia mostra que é preciso enxergar o território como uma Paisagem Cultural completa, que inclua não só as fachadas urbanas, mas também a arquitetura dos engenhos, o entorno natural e o patrimônio imaterial ligado a eles.

O ASSÚ (RN)

Como desdobramento da pesquisa, iniciou-se também o estudo do Assú (RN), sítio histórico de pequeno porte que não integrava o recorte original do plano de trabalho, mas que se revelou relevante por dialogar com as problemáticas já identificadas em Icó, Sobral e Areia. Diferentemente das demais cidades estudadas, Assú não possui sítio histórico tombado, o que acrescenta uma camada específica de análise a esse desdobramento. O levantamento ainda é preliminar, mas já aponta que sítios de pequeno porte enfrentam desafios distintos dos observados em centros históricos de maior escala, sobretudo no que se refere à disponibilidade de recursos técnicos e institucionais para processos de normatização mais aprofundados.

Os mapeamentos de gabarito e uso do solo produzidos em QGIS mostram o predomínio de edificações térreas, com alguma verticalização concentrada a leste, e um uso do solo majoritariamente residencial nos quarteirões periféricos e comercial nos eixos centrais, em torno de uma praça que organiza o espaço público. Também se percebe a permanência do lote de características portuguesas, estreito e alongado, nos quarteirões mais antigos, em contraste com o parcelamento mais recente, de lotes maiores e regulares. À luz de Teixeira (2009), isso mostra uma estrutura fundiária ainda legível, mas que já convive com tensões entre a morfologia histórica e o adensamento em curso em alguns pontos.

SÍNTESE COMPARATIVA

A leitura conjunta dos três casos analisados aponta um padrão comum: normativas tecnicamente consistentes, mas pouco abertas à participação social. Em Icó, a normatização seguiu uma lógica técnica e preventiva, baseada em regras já definidas. Sobral avançou para um modelo mais deliberativo, com a criação do COMPAC, ainda que a aplicação prática das normas continue gerando atritos pontuais. Já em Areia, a natureza técnica e regulatória da Portaria nº 297/2010 não previu mecanismos claros de participação social, o que ajuda a explicar por que o patrimônio rural ficou de fora do escopo de proteção. São processos distintos, moldados pelas particularidades de cada município, mas que compartilham a mesma dificuldade em equilibrar norma técnica e realidade local, dificuldade que o caso ainda preliminar do Açu tende a confirmar.

A RELAÇÃO COM OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Essa discussão também pode ser lida à luz dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, especialmente nas práticas de normatização identificadas em Icó, Areia e Açu. O ODS 11, em sua meta 11.4, trata diretamente da proteção e salvaguarda do patrimônio cultural e natural mundial. Os processos mais prescritivos e menos participativos observados em Icó e Areia atendem só em parte a essa meta, já que priorizam parâmetros construtivos em detrimento do reconhecimento dos valores atribuídos pelas comunidades locais.

O trabalho dialoga ainda com o ODS 16, voltado à promoção de instituições eficazes, responsáveis e participativas, ao discutir em que medida os processos de tombamento analisados incorporaram, ou não, etapas de escuta e pactuação social. Os casos analisados reforçam essa relação ao mostrar que sítios de pequeno porte enfrentam

limitações institucionais capazes de comprometer o alcance desses objetivos, o que reforça a necessidade de instrumentos normativos mais sensíveis às realidades locais.

Conclusão

Este estudo teve como objetivo compreender os percursos normativos do IPHAN em Icó, Sobral e Areia, sítios históricos de pequeno porte pouco discutidos nas pesquisas sobre normatização patrimonial, somando a esses casos um olhar inicial sobre o Açu. De modo geral, os resultados confirmam que a ampliação do conceito de patrimônio, da ideia de "cidade-monumento" para a de "cidade-documento", ainda não se traduziu de forma equivalente na prática normativa desses núcleos, que seguem caminhos distintos entre si e enfrentam, cada um a seu modo, dificuldades em conciliar rigor técnico e vida cotidiana.

O caso do Açu, ainda que preliminar, mostrou-se um bom complemento à pesquisa: por não possuir tombamento federal e carregar uma morfologia urbana ainda bastante legível, o município evidencia como a ausência de instrumentos normativos formais pode deixar sítios de pequeno porte mais vulneráveis a processos de descaracterização, o que reforça a pertinência de incluí-lo nas próximas etapas do estudo junto a Icó, Sobral e Areia.

Do ponto de vista metodológico, a combinação entre revisão documental e mapeamento em QGIS se mostrou adequada para captar tanto os aspectos formais das normativas quanto a leitura territorial dos sítios estudados, e deve seguir sendo aprimorada com levantamentos fotográficos e visitas técnicas nas fases seguintes da pesquisa.

Por fim, este trabalho reforça que sítios históricos de menor porte e sem salvaguarda federal formal carecem de maior atenção institucional e acadêmica. A pesquisa segue agora para etapas complementares, com a ampliação do recorte para outras cidades de pequeno e médio porte, de modo a consolidar um panorama mais amplo sobre os limites e avanços da normatização patrimonial no interior do país.

Referências

BRASIL; MINISTÉRIO DA CULTURA/IPHAN. **Normas de preservação para bens tombados em contextos urbanos: manual de orientações**. Brasília: Iphan, 2025.

CASTRIOTA, Leonardo. **Patrimônio Cultural: conceitos, políticas, instrumentos.** São Paulo:Annablume, 2009.

CHOAY, Françoise. **A alegoria do patrimônio.** São Paulo: Estação Liberdade/Ed. da UNESP, 2006.

FERREIRA, Anna Cristina Andrade. **O descuido de se tombar: A importância da paisagem cultural dos engenhos de cachaça e rapadura como patrimônio do município de Areia.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2010.

FONSECA, Maria Cecília Londres. **O Patrimônio em Processo: trajetória da política federal de preservação no Brasil.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005.

HALBWACHS, Maurice. **A memória coletiva.** São Paulo: Revista dos Tribunais Ltda, 1990.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). **Normas de preservação para bens tombados em contextos urbanos: manual de orientação Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (Iphan).** Dados eletrônicos (1 arquivo PDF). – Brasília : Iphan, 2025. 153 p. Disponível em: : www.gov.br/ipha em: 27/08/2026.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). **Portaria nº 15, de 21 de janeiro de 2019.** Brasília: IPHAN, 2019.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). **Portaria nº 297, de 04 de outubro de 2010.** Brasília: IPHAN, 2010.

LACERDA, Norma; ZANCHETTI, Sílvio Mendes. **Plano de gestão da conservação urbana: conceitos e métodos.** Olinda: Centro de Estudos Avançados da Conservação Integrada, 2012.

NASCIMENTO, José Clewton do. **(Re)descobriram o Ceará?: representações dos sítios históricos de Icó e Sobral: entre areal e patrimônio nacional.** 2. ed. Salvador: EDUFBA, 2013

OLIVEIRA, Lívia Nobre de. **Arcaicó, modo de amar: proposta de boas práticas para o casario antigo caicoense. 2020**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

SANT'ANNA, Márcia. **Da cidade-monumento à cidade-documento: a norma de preservação de áreas urbanas no Brasil 1937-1990.** Salvador: Oiti Editora, 2014.

SOBRAL (Município). **Lei nº 2.291, de 25 de outubro de 2022.** Sobral: Prefeitura Municipal de Sobral, 2022.

TEIXEIRA, Rubenilson Brazão. **Da cidade de Deus à cidade dos homens: a secularização do uso, da forma e da função urbana.** Natal: EDUFRN, 2009.

Anexos



Figura 1 - Mapa do uso do solo de Assú/rn



Figura 2 - Mapa de gabarito de Assú/rn



Quadro 1 - Quadro sintese dos instrumentos normativos

CÓDIGO: HS1258

AUTOR: GABRYELLE LOPES DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: AMIRIA BEZERRA BRASIL

TÍTULO: CONTRIBUIÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO, MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DOS ASSENTAMENTOS INFORMAIS E EXPERIÊNCIAS DE PLANEJAMENTO POPULAR EM NATAL

Resumo

A formação dos territórios habitacionais do Brasil no contexto da globalização não ocorre de maneira acidental, mas é resultado de uma modernização excludente e intencional associada às raízes coloniais, que tem como fruto a segregação socioespacial presente nos territórios ocupados por assentamentos informais (Maricato, 1995). O processo de evolução desses territórios em Natal não se deu de maneira diferente e os instrumentos de planejamento, mapeamento e caracterização contribuem para isso, visto que a cartografia também pode ser utilizada como aparato de controle social e político a depender do enviesamento do órgão responsável (Harley, 1995). Pensando nisso, a pesquisa se objetivou a reunir dados e mapear as favelas e comunidades urbanas distribuídas por Natal e caracterizá-las a partir das informações levantadas como subsídio ao campo acadêmico e eventuais processos de planejamento urbano e popular. Como resultado, os pesquisadores envolvidos conseguiram elaborar fichas contendo mapas com aspectos morfológicos, ambientais e físico-territoriais das comunidades e caracterização a partir de variáveis tipológicas e, futuramente, buscam sintetizar os resultados em plataformas digitais com acesso público.

Palavras-chave: Favelas. Cartografia. Natal. Caracterização.

TITLE: CONTRIBUITION TO THE IDENTIFICATION, MAPPING, AND CHARACTERIZATION OF INFORMAL SETTLEMENTS AND POPULAR PLANNING EXPERIENCES IN NATAL

Abstract

The formation of Brazilian residential territories in the context of globalization does not occur accidentally, but is the result of an exclusionary and intentional modernization associated with colonial roots, which has resulted in the socio-spatial segregation present in territories occupied by informal settlements (Maricato, 1995). The evolution of these territories in Natal followed this same pattern, a process reinforced by planning, mapping, and characterization tools – given that cartography can serve as an instrument of social and political control depending on the biases of the responsible agency (Harley, 1995). With this in mind, the research aimed to gather data and map the favelas and urban communities distributed throughout Natal, characterizing them based on the information collected as a contribution to the academic field and potential urban and popular planning processes. As a result, the researchers involved were able to develop fact sheets containing maps with morphological, environmental, and physical-territorial aspects of the communities, as well as characterization based on typological variables. In the future, they seek to synthesize the results on digital platforms with public access.

Keywords: Favelas. Cartography. Natal. Characterization.

Introdução

A pesquisa denominada “Cartografia em conflito: Identificação, mapeamento e caracterização dos assentamentos informais e das práticas de planejamento popular”, em associação ao núcleo de pesquisa Observatório das Metrópoles de Campina Grande/PB, com o projeto aprovado em edital Universal do CNPQ intitulado “Estratégias, Instrumentos e Tecnologias para Urbanização e Gestão Participativa de Favelas de João Pessoa, Campina Grande / PB e Natal / RN em Contexto de Conflitos Territoriais e Eventos Climáticos” tem como objetivo sistematizar e sintetizar, através de instrumentos de mapeamento e caracterização, baseados na metodologia do Ministério das Cidades, dados quantitativos e qualitativos acerca das favelas e comunidades urbanas em Natal.

As cidades, no contexto de desenvolvimento industrial e pós-industrial do século XX, foram protagonistas e narradoras de inúmeras transformações sociais, econômicas e culturais na relação que desenvolveram com os habitantes e as novas formas de ocupação do território. Em inúmeros países na periferia do capitalismo, como o Brasil, que foram sujeitos à difusão das propostas de globalização, fatores como o agregamento de valor ao solo urbano e a comercialização de terras concentradas nas mãos do mercado imobiliário formal e capitalista foram indispensáveis para o agravamento das desigualdades seculares que remontam um passado de dominação colonial (Maricato, 1995). Tais instrumentos de dominação são responsáveis pela formação espontânea das favelas no território informal, excluídas de todo e qualquer meio de participação nos centros urbanos.

A capital potiguar não se isenta de tal arranjo econômico e social. Sob essa problemática, a presença dos instrumentos de cartografia é indispensável para colocar em evidência as condições em que as comunidades informais se assentam e as formas de ocupação do

território. Brian Harley (1995) afirma que "os mapas exercem uma influência social, tanto por suas omissões quanto pelos elementos que elas representam e valorizam" e, nesse viés, é possível criar uma associação com a produção gráfica baseada no mapeamento e caracterização dos assentamentos natalenses que, a depender do órgão responsável, é inconstante e incongruente. É a partir dessas inconsistências que a população é submetida à condições de invisibilização nas políticas públicas, de maneira intencional ou não.

Nesse contexto, o presente trabalho busca apresentar as produções cartográficas e textuais desenvolvidas por uma parcela do grupo associado ao projeto de Estudos Contemporâneos do Habitat (ECOHabitat) composta por quatro alunos, voluntários e bolsistas, durante o ano pela pesquisa a partir da confluência de instrumentos urbanísticos oficiais vigentes em Natal no ano de 2026, produções textuais acerca da temática e consultas populares.

Metodologia

O processo de revisão bibliográfica e documental foi efetivo para embasamento teórico acerca do reconhecimento dos vestígios reunidos e que explicitam o processo da ocupação favelística e secular em Natal (Soares, Cadó e Oliveira, 2024). A partir da leitura, foi possível apreender as dinâmicas de ocupação do território e compreender aspectos históricos indispensáveis na formação dos assentamentos informais na cidade.

A partir disso, a pesquisa dividiu-se em duas etapas de produção: a elaboração de registros cartográficos a partir de uma base quantitativa de dados disponibilizados por órgãos públicos, com destaques para a Prefeitura de Natal e o IBGE no que tange às delimitações estabelecidas para os assentamentos, zoneamentos vigentes e áreas de fragilidade ambiental, e uma segunda etapa que visa a sistematização e caracterização de assentamentos baseado na metodologia do "Guia para o Mapeamento e Caracterização de Assentamentos Precário", elaborado e disponibilizado pelo Ministério das Cidades (2010).

Até o presente momento, o projeto se propôs a sistematizar e mapear um quantitativo de 28 assentamentos informais, sendo esse total uma amostra extraída do todo estudado. O mapeamento é elaborado sobre a base cartográfica estruturada no sistema de Coordenadas Métricas Universal Transversa de Mercator (UTM), no fuso 25 Sul, pela ferramenta de georreferenciamento Qgis (figura 01).

Os dados são extraídos do IBGE, Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB), Prefeitura Municipal de Natal e Mapbiomas e são sintetizados em doze mapas com funções de identificação e localização, delimitação, contagem de domicílios, leitura da distribuição de renda, morfologia e topografia do assentamento, zoneamentos vigentes, infraestrutura disponível, condições ambientais e classificação de graus de risco para o território. As informações reunidas e representadas pela cartografia estão dispostas em fichas contendo o nome dos assentamentos (figura 02).

Para além do mapeamento, há a etapa da caracterização – procedimento este elaborado em paralelo – associada à seis variáveis tipológicas: acesso à moradia, terreno, localização, traçado urbano, infraestrutura, condição da unidade habitacional e resulta na classificação predominante do assentamento (MCidades, 2010). Tal metodologia de classificação e caracterização é embasada por referencial bibliográfico e documental, extraídos de repositórios e acervos digitais acerca dos dados sobre os assentamentos informais em Natal, como Trabalhos Finais de Graduação, teses, dissertações e acervos em jornais e revistas. O conteúdo da segunda etapa é sintetizado juntamente com um mapa apresentando a inserção do assentamento sobre uma imagem de satélite (figura 03 anexo). A partir do avanço dos estágios de produção, foi possível produzir um resumo expandido, além das próprias fichas.

Resultados e Discussões

Através do último ano de produção, este plano de trabalho se dedicou à produção em dois pilares da pesquisa: o mapeamento e a confecção de conteúdos faltantes na base e a produção textual que visou caracterizar, de maneira preliminar, os assentamentos inseridos na amostra.

O trabalho atuou no preenchimento de lacunas na base cartográfica de dados disponibilizadas por órgãos públicos, dedicando-se à produção de elementos essenciais para a análise tipomorfológica dos assentamentos precários — como o mapeamento vetorial e a atualização das edificações componentes do território favelístico de Natal, em partes defasado nas plataformas oficiais.

Adicionalmente, durante pesquisas anteriores e visitas in loco para a realização de conversas e discussões com moradores e lideranças locais, identificamos divergências entre as delimitações espaciais adotadas por órgãos federais de base censitária, como o IBGE (2022), e os instrumentos de escala local, como o Plano Local de Habitação de Interesse Social (PLHIS, 2011), o Plano Diretor de Natal (Natal, 2022) e as informações coletadas pela consulta popular. A ausência de conteúdo e materiais para análise cartográfica e as discrepâncias nas delimitações estabelecidas podem representar um

obstáculo na implementação de políticas públicas habitacionais e na abrangência de zoneamentos especiais voltadas aos assentamentos (Soares, Souza e Cadó, 2024) e por isso evidenciar as delimitações nas produções cartográficas da pesquisa é imprescindível.

Ademais, a partir do levantamento sistemático e da consolidação de fichas analíticas, foi possível traçar paralelos entre as dinâmicas de ocupação das favelas e comunidades urbanas no município. A articulação entre variáveis físico-territoriais, topográficas, ambientais e morfológicas permite reconhecer e categorizar os padrões de ocupação vigentes em Natal, os quais se mostram fortemente condicionados aos aspectos físicos, marcados pela presença das dunas e dos corpos hídricos. Para além das características ambientais, a formulação das fichas possibilitou uma análise de caráter morfológico dos assentamentos, permitindo a visualização das relações entre traçado, parcelamento e edificação e a extração de resultados baseados em análises desenvolvidas no resumo expandido produzido pelo grupo.

Simultaneamente à confecção das fichas com as sintetizações cartográficas, realizou-se a produção textual que se objetivou a caracterizar os assentamentos informais de Natal a partir das variáveis anteriormente citadas e elaboradas pelo MCidades (2010). Assim como a etapa de mapeamentos, a produção textual possibilita a sobreposição de características comuns aos assentamentos e pode ser utilizada para eventuais consultas quando disponibilizadas ao público.

Percebeu-se, até o presente momento, o padrão classificatório predominante de favela nas amostras dentre os possíveis estabelecidos pelo Ministério das Cidades (sendo eles a favela, o loteamento irregular, o conjunto habitacional e o cortiço). Tal classificação é identificada a partir da ocupação irregular de terrenos, seguida por um traçado urbano espontâneo, habitações autoconstruídas com materiais de baixa durabilidade e inseridas em lotes de dimensões disformes. É necessário compreender, no entanto, que o processo de classificação ainda se encontra em fase preliminar e sob revisão, embora a expectativa seja a de eventual ampliação da amostra com o objetivo de contemplar todos os 99 assentamentos informais, incluindo os previamente removidos e os não contemplados por planos oficiais, identificados na cidade de Natal pela bibliografia e utilizadas pela pesquisa.

Conclusão

Durante o período de pesquisa foi possível sistematizar e mapear um quantitativo valioso de informações sobre as favelas e comunidades urbanas natalenses. Conclui-se, portanto, que, embora o processo de ocupação do território informal da cidade estabeleça concordâncias através de elementos físicos e naturais, ainda há uma diversidade que

independe de limites territoriais ou administrativos. Além disso, fica explícita a necessidade desse tipo de produção para o fornecimento de subsídio ao campo acadêmico e para a fundamentação de possíveis novas ferramentas de planejamento urbano voltadas à consolidação das favelas no tecido urbano natalense.

Por fim, o projeto encerra o ciclo com resultados positivos na contribuição para o mapeamento e caracterização dos assentamentos informais de Natal. Permanecendo com o mesmo objetivo, a pesquisa dará continuidade à estruturação das fichas e das produções textuais e pretendemos sintetizá-las em cadernos informativos para eventuais consultas. Posteriormente, desejamos universalizar o acesso aos resultados do projeto por meio de plataformas digitais a partir dos mesmos moldes utilizados pelo grupo de pesquisa da Paraíba associada ao plano de trabalho.

Referências

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. Guia para o mapeamento e caracterização de assentamentos precários. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2010.

HARLEY, B. **Mapas, saber e poder. Confins. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de geografia**, n. 5, 19 mar. 2009.

MARICATO, Ermínia. **Metrópole na periferia do capitalismo:** ilegalidade, desigualdade e violência. São Paulo, 1995.

NATAL. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Habitação, Regularização Fundiária e Projetos Estruturantes. **Processo de elaboração do Plano Local de Habitação de Interesse Social – PLHIS: etapa 01 – proposta metodológica.** Natal: Prefeitura Municipal do Natal, 2011.

SOARES, Bernardo Nascimento; CADÓ, Júlia Cláudia de Araújo; e OLIVEIRA, Daniel Victor Fernandes. **Entre casebres, cabanas e choupanas:** vestígios e indícios da origem da favelização em Natal (Rn), 1890-1930. In: Anais do 18º Seminário Nacional de História da Cidade e do Urbanismo (SHCU). Natal, 2024.

SOARES, Bernardo Nascimento; SOUZA, Iago Felipe; CADÓ, Júlia Cláudia de Araújo. **Imprecisões cartográficas:** favelas de Natal/RN. In: Anais do IV UrbFavelas. São Paulo, 2024.

Anexos



Figura 01 - Interface da base de dados georreferenciados produzida pelos alunos.



Figura 02 - Ficha produzida com os mapas do assentamento Cidade Praia extraído da amostra gerada pela ferramenta Qgis.



Figura 03 - Ficha produzida com a caracterização e classificação do assentamento Cidade Praia extraído da amostra pela ferramenta Qgis.

CÓDIGO: HS1443

AUTOR: THAMYLLYS KARYELE DANTAS DE MEDEIROS

ORIENTADOR: RENATO DE MEDEIROS

TÍTULO: Do anúncio impresso ao marketing digital: representações de edifícios verticais residenciais em Natal/RN, ontem e hoje

Resumo

A partir de pesquisas desenvolvidas anteriormente, o atual estudo em formação trás o objetivo central de entender a divulgação e representação dos primeiros edifícios verticais de Natal/RN. Relacionando as suas estratégias publicitárias e separando suas representações com bases em atributos definidos ao longo do processo de análise. Essas informações foram encontradas utilizando jornais antigos (O Poti e o Diário de Natal) disponíveis no site da Hemeroteca Digital. A partir disso, foram definidos os atributos de Linguagem, Presença de Figuras Públicas, Fachada e Planta-baixa. Através disso, será possível entender os elementos que contribuíram para que a população passasse a sair de casas térreas e serem convencidas a morar em apartamentos. Sendo notável a contribuição da atual pesquisa em desenvolvimento para a realização de uma comparação entre a publicidade antiga dos empreendimentos e a atual.

Palavras-chave: Apartamento; Atributos; Verticalização.

TITLE: From print advertising to digital marketing: representations of residential high-rises in Natal, RN—past and present

Abstract

Building on prior research, this ongoing study aims to understand how the first high-rise buildings in Natal, RN, were promoted and represented. It examines their advertising strategies and categorizes their representations based on attributes defined during the analysis process. Data were gathered from historical newspapers (O Poti and Diário de Natal) available via the Digital Newspaper Archive (Hemeroteca Digital). Based on this, specific attributes were established: language, the presence of public figures, façade, and floor plan. This approach makes it possible to identify the factors that persuaded the population to transition from single-story houses to apartment living. The study also offers a valuable opportunity to compare the advertising used for these early developments with contemporary real estate marketing.

Keywords: Apartment; Attributes; Verticalization.

Introdução

A presente pesquisa em desenvolvimento é uma continuidade de pesquisas anteriores sobre habitação multifamiliar na cidade de Natal/RN. Assim, essa pesquisa busca realizar um estudo intrínseco em fontes históricas - os jornais O Poti (RN) e Diário de Natal (RN) disponíveis no acervo digital da Hemeroteca Digital da Biblioteca Nacional sobre o início do processo de verticalização na cidade, que se iniciou na década de 1960, estendendo o estudo até a década de 1980. Essa análise utilizará o acesso à propagandas, anúncios e matérias dos primeiros edifícios verticais da cidade, possibilitando a identificação das estratégias de marketing utilizadas (atributos como: linguagem, fachadas, presença de figuras públicas e plantas-baixas) neste período de forma a convencer a população a mudar a sua habitação. A partir disso, o atual trabalho tem como objetivo central compreender os fatores urbanos, publicitários e textuais que possibilitaram o aumento do processo de verticalização na cidade de Natal/RN.

Metodologia

O método utilizado para conseguir os dados essenciais para essa pesquisa foi uma pesquisa hemerográfica realizada na Hemeroteca Digital. Nesse site, foram analisados os jornais do Poti e do Diário de Natal, a fim de encontrar o início do processo publicitário acerca do início da verticalização em Natal. Nesse contexto, foram pesquisadas palavras chaves nos periódicos da década de 60 até a de 90. As palavras chaves dos empreendimentos principais analisados foram os seguintes termos: "Edifício Esmeralda", "Ecocil", "Morada Caminho do Mar", "Edifício Mary", condomínio apartamento, "Chácara 402", "Ecocil lançamento", "Condomínio edifício" e "Manoel de Macedo Brito".

Esses elementos pesquisados na Hemeroteca foram decididos após uma busca nos jornais, percebendo principalmente anúncios das reuniões dos condôminos. É importante destacar que foram encontrados um total de 10 anúncios de empreendimentos, alguns se repetindo ao longo dos periódicos nas semanas seguintes. Além disso, foram encontradas propagandas de imóveis particulares que não eram feitas por uma agência publicitária. A partir disso, têm-se o objetivo de classificar e dividir os empreendimentos encontrados em 4 categorias: Fachada, Planta-baixa, Presença de Figuras Públicas e Linguagem.

Resultados e Discussões

3.1 A PUBLICIDADE IMOBILIÁRIA NO PROCESSO DE VERTICALIZAÇÃO

Vários estudos já se concentraram a explicar o processo de verticalização no Brasil, em especial nas grandes cidades, como São Paulo e Rio de Janeiro. Esse processo se inicia com o objetivo de multiplicar o solo urbano a partir do preço da terra que é influenciada a partir de fatores, como localização, infraestrutura local, vizinhança e as relações sociais existentes. Ermínia Maricato (2024) em sua aula sobre a produção capitalista no espaço urbano traz um questionamento acerca da existência da especulação do preço da terra, e relaciona essa indagação ao discurso do mercado imobiliário que utiliza as ideias de "renovação" e deterioração para fomentar as vendas e incentivar à compra dos imóveis. De modo análogo, Alves (2009) mantém a mesma linha de raciocínio ao abordar em seus estudos a moradia como uma mercadoria especial que, apesar de não poder ser utilizada instantaneamente, ganha existência e valor a partir das estratégias de marketing utilizadas. Desse modo, é notável como as estratégias publicitárias participam e auxiliam no processo de compra de um produto, utilizando recursos textuais, gráficos e atributos do empreendimento para fomentar o desejo de consumo.

Em seu estudo sobre a publicidade imobiliária, Vargas (2014) aborda a comunicação como princípio fundamental da publicidade, a qual aplica signos que transformam significados, funções e formas dependendo da mensagem que o mercado quer transmitir para o seu público alvo. Como forma de exemplificação, Vargas trás uma análise acerca do processo de verticalização na cidade de São Paulo, com início em 1889, se estendendo até 1990. No estudo em questão, é possível perceber a mudança do discurso da indústria ao longo de cada período, estreando sua linguagem comunicativa incentivando a compra de edificações com estética europeia, proximidade com áreas de transporte e com boas condições de higiene no espaço. Logo mais, em 1950, a possibilidade de personalizar os apartamentos, espaços de área de lazer e figuras públicas importantes comprando os imóveis anunciados permitiram que as pessoas passassem a trocar sua moradia térrea por apartamentos. De 1960 até 1990, comprar edifícios verticais passou a ser sinônimo de qualidade de vida e conforto, criando-se os motes de venda que variam de acordo com as proximidades do terreno, estilo de vida do público alvo e nível de exclusividade. Pode-se entender a partir desse estudo, que o processo de verticalização, apesar de acontecer em períodos diferentes em cada região, ocorre com o objetivo de ter como ato final do consumidor a decisão de compra. A expansão vertical na cidade de Natal/RN se intensifica no período de 1980, segundo Queiroz (2012), a partir de uma intensa produção de habitações. Diante disso, é observável que, apesar da diferença em relação ao período de intensificação desse processo, a necessidade de um marketing de investimento elevado se mantém necessário para a criação de um vínculo com o consumidor, permitindo que o investimento ocorra com sua total potencialidade, como aborda Travassos (2009).

3.2 ANÁLISES DOS ANÚNCIOS

Ao observar inicialmente os empreendimentos Edifício Esmeralda, Morada Riomar, Edifício Morada Caminho do Mar, Edifício Mary, Ana Terra, Chácara 402, Luciano Barros, Edifício 21 de Março, Barão do Rio Branco e Edifício Salmar encontrados durante a pesquisa no site da Hemeroteca, foram identificados

alguns padrões nos anúncios publicitários. Esses atributos pré-selecionados foram pré-distribuídos entre os edifícios encontrados, de modo que, posteriormente, eles sejam subdivididos em apenas 4 edificações permaneçam como eixo de análise principal.

Planilha 01 - Planilha Comparativa entre os Empreendimentos (presente em Anexos)

A planilha 1 faz parte do estudo e análise do diferencial entre os empreendimentos, possibilitando uma melhor visualização e comparação precisa dos atributos estabelecidos. De modo inicial, se estabelece uma divisão, mas que terá alterações e maior aprofundamento ao longo do desenvolvimento da pesquisa. Nesse contexto, como mais de uma característica foram observadas em alguns edifícios, para fins didáticos, iremos apresentar as respectivas imagens retiradas dos jornais O Diário de Natal e O Poti, aproveitando para relacioná-las e realizar uma explicação acerca dos elementos presentes nelas, mas ainda sem realizar a distribuição efetiva, pois essa etapa será realizada posteriormente nas próximas etapas da pesquisa.

Figura 01 - Imagens Publicitárias dos Empreendimentos 1 (presente em Anexos)

Os empreendimentos observados na Figura 01 são, respectivamente, 21 de Março, Edifício Salmar, Ana Terra e Edifício Esmeralda. Ambos possuem a fachada como elemento principal no anúncio publicitário, mostrando a imponência e desenvolvimento dos edifícios verticais. Há um diferencial nas imagens das primeiras edificações com as 3 e 4, visto que, apesar de ambas mostrarem a parte volumétrica e frontal do edifício, as primeiras apresentam também a linguagem como uma característica importante. Isso pode ser comprovado ao se observar as frases “Um marco de desenvolvimento” e “No melhor ponto!” que ressaltam o objetivo do mercado imobiliário de gerar desejos e transmitir uma ideia de status social, sendo a comunicação um importante elemento publicitário, segundo Vargas (2014).

Figura 02 - Imagens Publicitárias dos Empreendimentos 2 (presente em Anexos)

A figura 02 apresenta os imóveis Edifício Mary, Chácara 402 e Luciano Barros. Os três possuem como elementos a presença de Planta-baixa e Linguagem, de modo que o consumidor pudesse visualizar os ambientes, incluindo o design de interiores possível de ser visualizado nas imagens. Em relação ao eixo comunicativo, pode-se notar uma continuação do que foi observado na figura anterior, contando com a presença de frases de efeito.

Figura 03 - Imagens Publicitárias dos Empreendimentos 3 (presente em Anexos)

A figura 03 são dos imóveis Morada Caminho do Mar, Morada Riomar e Barão do Rio Branco. Eles apresentam um diferencial quanto ao jornal que foram encontrados, visto que a imagem 10 foi localizada no jornal “O Poti”. Em relação aos atributos, ambos possuem a presença da fachada como elemento principal. Mas os edifícios 9 e 10 possuem a presença de figuras públicas em

seus textos. Isso está relacionado com o objetivo do mercado imobiliário de gerar identificação com os futuros compradores, permitindo que eles se interessem pelo empreendimento a partir das pessoas que irão morar nele.

Conclusão

A partir disso, pode-se concluir a importância dessa pesquisa em desenvolvimento para que seja possível entender como foi o processo de divulgação dos primeiros edifícios verticais em Natal/RN. Assim, entendendo as táticas utilizadas e sendo possível, futuramente, compará-las com as atuais estratégias de marketing.

Referências

PÓSARQ UFSC - DISCENTES. **Aula 1: A produção capitalista do espaço urbano - Conflitos e contradições**. [S.l.]: Youtube, 2023. Disponível em: https://youtu.be/xOYre3REEtc?si=qbmRrs2maFxvNj7. Acesso em: 13 abr 2026.

ALVES, Maria Cristina Dias. Publicidade imobiliária e suas construções retóricas. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DA COMUNICAÇÃO, 32., 2009,

Curitiba. **Anais** [...]. São Paulo: Intercom, 2009.

VARGAS, Heliana Comin. Publicidade imobiliária: o que se está vendendo? In:

VARGAS, Heliana Comin; ARAUJO, Cristina Pereira (orgs.). **Arquitetura e**

mercado imobiliário. Barueri: Manole, 2014. p. 53-71.

Anúncio Edifício 21 de Março. **Diário de Natal**, Natal, 1963. Disponível em: https://bndigital.bn.gov.br/hemeroteca-digital/. Acesso em: 26 maio 2026.

Anúncio Edifício Salmar. **Diário de Natal**, Natal, 1964. Disponível em: https://bndigital.bn.gov.br/hemeroteca-digital/. Acesso em: 26 maio 2026.

Anúncio Ana Terra. **Diário de Natal**, Natal, 1980. Disponível em: https://bndigital.bn.gov.br/hemeroteca-digital/. Acesso em: 10 maio 2026.

Anúncio Edifício Esmeralda. **Diário de Natal**, Natal, 1979. Disponível em: https://bndigital.bn.gov.br/hemeroteca-digital/. Acesso em: 19 maio 2026.

Anúncio Edifício Mary. **Diário de Natal**, Natal, 1986. Disponível em: https://bndigital.bn.gov.br/hemeroteca-digital/. Acesso em: 19 maio 2026.

Anúncio Chácara 402. **Diário de Natal**, Natal, 1975. Disponível em: https://bndigital.bn.gov.br/hemeroteca-digital/. Acesso em: 19 maio 2026.

Anúncio Luciano Barros. **Diário de Natal**, Natal, 1981. Disponível em: https://bndigital.bn.gov.br/hemeroteca-digital/. Acesso em: 10 maio 2026.

Anúncio Edifício Morada Caminho do Mar. **Diário de Natal**, Natal, 1978. Disponível em: https://bndigital.bn.gov.br/hemeroteca-digital/. Acesso em: 10 maio 2026.

Anúncio Morada Riomar. **Diário de Natal**, Natal, 1976. Disponível em: https://bndigital.bn.gov.br/hemeroteca-digital/. Acesso em: 10 maio 2026.

Anúncio Barão do Rio Branco. **O Poti**, Natal, 1967. Disponível em: https://bndigital.bn.gov.br/hemeroteca-digital/. Acesso em: 10 maio 2026.

Anexos



Planilha 01 - Planilha Comparativa entre os Empreendimentos



Figura 01 - Imagens Publicitárias dos Empreendimentos 1



Figura 02 - Imagens Publicitárias dos Empreendimentos 2



Figura 03 - Imagens Publicitárias dos Empreendimentos 3

CÓDIGO: HS1451

AUTOR: JOANNA MARIA FERREIRA DE OLIVEIRA MATEUS PINTO

ORIENTADOR: AMIRIA BEZERRA BRASIL

TÍTULO: Cartografia Social dos assentamentos informais e práticas de planejamento popular em Natal

Resumo

A pesquisa integra o projeto “Cartografia em conflito: Identificação, mapeamento e caracterização dos assentamentos informais e das práticas de planejamento popular”, desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O plano de trabalho previa a participação em oficinas de cartografia social e metodologias participativas, atividades que não foram realizadas durante o período analisado. As ações concentraram-se na construção das Fichas de Caracterização dos Assentamentos Populares e em atividades de formação articuladas entre pesquisa e ensino. Nesse contexto, a disciplina Tópicos Especiais em Projeto Urbano e Territorial 03 possibilitou o exercício de procedimentos de mapeamento, leitura sociotécnica, caracterização morfológica, análise de infraestrutura e construção de cenários urbanísticos. A experiência desenvolvida na favela da África foi sistematizada e relacionada às dimensões reunidas nas fichas, permitindo identificar aproximações entre diferentes procedimentos de leitura territorial. Discute-se, assim, como o redirecionamento do plano de trabalho contribuiu para a formação metodológica e para a construção de instrumentos de caracterização territorial no âmbito da iniciação científica.

Palavras-chave: Cartografia social; favelas; caracterização territorial; planejamento

TITLE: Social Mapping of informal settlements and community-led planning practices in Natal

Abstract

The research forms part of the project ‘Cartography in conflict: Identification, mapping and characterisation of informal settlements and grassroots planning practices’, carried

out at the Federal University of Rio Grande do Norte. The work plan had envisaged participation in workshops on social cartography and participatory methodologies; however, these activities did not take place during the period analysed. Efforts focused on compiling the Characterisation Sheets for Popular Settlements and on training activities that integrated research and teaching. In this context, the module 'Special Topics in Urban and Territorial Planning 03' enabled students to practise mapping procedures, socio-technical analysis, morphological characterisation, infrastructure analysis and the development of urban scenarios. The experience gained in the África favela was systematised and linked to the dimensions included in the profiles, enabling the identification of similarities between different procedures for territorial analysis. The paper thus discusses how the reorientation of the work plan contributed to methodological training and to the development of tools for territorial characterisation within the context of undergraduate research.

Keywords: Social cartography; favelas; territorial characterisation; planning.

Introdução

A urbanização brasileira consolidou cidades marcadas por desigualdades no acesso à terra, à moradia e à infraestrutura, nas quais os assentamentos de origem informal constituem parte significativa da produção do espaço urbano. Em Natal, a formação desses territórios integra a própria trajetória de urbanização da cidade. Estudos sobre a formação histórica da favelização no município evidenciam a presença desses processos desde o início do século XX, contribuindo para compreender os assentamentos informais como parte da constituição histórica do espaço urbano natalense (SOARES et al., 2024).

A caracterização desses territórios também se relaciona às formas pelas quais as políticas públicas reconhecem, delimitam e intervêm sobre as favelas. No campo da urbanização de favelas, compreender as especificidades de cada assentamento e suas condições de inserção urbana constitui uma dimensão relevante para a formulação de políticas e intervenções (SILVA; CARDOSO; DENALDI, 2022). A identificação e a caracterização territorial envolvem, portanto, a articulação de informações espaciais, sociais, ambientais e infraestruturais, contribuindo para uma leitura mais consistente dos processos que estruturam esses territórios.

É nesse contexto que se insere o projeto "Cartografia em conflito: Identificação, mapeamento e caracterização dos assentamentos informais e das práticas de planejamento popular", desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. A pesquisa articula dados oficiais, processos de caracterização territorial, práticas de planejamento popular e metodologias participativas, tendo entre seus objetivos a identificação, o mapeamento e a caracterização dos assentamentos informais de Natal, além da elaboração de instrumentos relacionados à leitura desses territórios.

O plano de trabalho previa a participação em oficinas de cartografia social e no desenvolvimento de tecnologias sociais junto às comunidades. Durante o período analisado, essas atividades não foram realizadas. O trabalho concentrou-se na

construção das Fichas de Caracterização dos Assentamentos Populares e em atividades de formação relacionadas à leitura territorial, desenvolvidas em articulação com a disciplina Tópicos Especiais em Projeto Urbano e Territorial 03.

O componente curricular, voltado à urbanização de favelas, foi estruturado em três unidades dedicadas aos fundamentos da urbanização de favelas; ao mapeamento, à caracterização e às leituras sociotécnicas; e à elaboração de propostas conceituais. A experiência com a favela da África possibilitou exercitar procedimentos de leitura da inserção urbana, observação de campo, análise morfológica, infraestrutura, habitabilidade, riscos e construção de sínteses territoriais.

Diante disso, o trabalho tem como objetivo sistematizar o percurso desenvolvido no âmbito da iniciação científica, considerando o redirecionamento das atividades inicialmente previstas e analisando as relações entre a construção das Fichas de Caracterização dos Assentamentos Populares e as experiências de leitura territorial desenvolvidas a partir da favela da África.

Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida a partir da sistematização das atividades realizadas durante o período analisado e de sua relação com os objetivos do projeto “Cartografia em conflito”. O percurso foi organizado em duas frentes articuladas: a participação na construção das Fichas de Caracterização dos Assentamentos Populares e a formação metodológica desenvolvida no âmbito da disciplina Tópicos Especiais em Projeto Urbano e Territorial 03. A partir dessas experiências, realizou-se uma leitura comparativa dos procedimentos de caracterização utilizados em cada contexto.

A elaboração das Fichas de Caracterização envolveu a organização de informações de diferentes naturezas sobre os assentamentos investigados. O instrumento reúne dados descritivos, cartográficos, socioeconômicos e ambientais, articulados a mapas temáticos referentes a aspectos como parcelamento, topografia, zoneamento, renda, infraestrutura e áreas de risco. Para esta pesquisa, foram observadas sua estrutura e as dimensões utilizadas na composição da caracterização territorial, considerando a forma como diferentes informações são reunidas e relacionadas em uma mesma base de leitura.

A segunda frente correspondeu à experiência formativa proporcionada pela disciplina. Conforme seu plano de ensino, o componente articulou aulas expositivas, seminários, atividades de campo, ateliês e painéis, distribuídos em três unidades. A primeira abordou a formação histórica das favelas, políticas habitacionais e programas de urbanização; a segunda concentrou-se em mapeamento, caracterização e leituras sociotécnicas; e a terceira trabalhou a elaboração de cenários e propostas conceituais de urbanização.

Na favela da África, foram desenvolvidas atividades de leitura da inserção urbana, visitas de campo, levantamento de informações históricas e socioeconômicas, análise de infraestrutura e habitabilidade e elaboração de sínteses territoriais. Os procedimentos

envolveram a consulta a bases cartográficas e documentais, a observação direta do território e a produção de representações gráficas destinadas à organização e comunicação dos dados levantados. Os resultados dessas etapas foram reunidos em materiais de apresentação e painéis produzidos ao longo da disciplina.

A análise comparativa considerou categorias presentes nos dois processos, como inserção urbana, traçado e parcelamento, infraestrutura, aspectos socioeconômicos, condições ambientais e de habitabilidade, riscos e síntese territorial. O objetivo foi reconhecer convergências entre os procedimentos de leitura e compreender sua contribuição para a formação metodológica, sem estabelecer uma relação direta entre os produtos da disciplina e a elaboração das fichas.

Resultados e Discussões

3.1 A construção das Fichas de Caracterização

A elaboração das Fichas de Caracterização dos Assentamentos Populares demandou a organização de informações provenientes de diferentes fontes e sua reunião em uma estrutura comum de leitura. O instrumento combina dados de natureza territorial, morfológica, socioeconômica, ambiental e infraestrutural, permitindo observar relações que dificilmente seriam apreendidas a partir de uma única base ou indicador. A disposição conjunta dessas informações também favorece uma leitura comparativa entre assentamentos, mantendo, ao mesmo tempo, elementos específicos de cada território.

Sua estrutura reúne identificação e localização, caracterização tipológica, infraestrutura, aspectos socioeconômicos, histórico da ocupação, condições ambientais e situações de risco. A presença dessas dimensões em um mesmo instrumento aproxima diferentes escalas de análise: a configuração física do assentamento, sua inserção na cidade e as condições sociais e ambientais que participam de sua produção. A ficha, portanto, não funciona somente como uma forma de apresentação dos dados já levantados, mas como uma estrutura que orienta a forma de organizar e relacionar as informações.

Figura 1 - Ficha de Caracterização dos Assentamentos Populares.

Fonte: Projeto de Pesquisa Cartografia em conflito, 2026.

Esse processo também evidenciou o caráter seletivo da própria sistematização. Definir quais informações devem ser incorporadas, estabelecer relações entre elas e escolher como serão representadas são decisões que interferem na leitura produzida sobre o território. A ficha se constitui, assim, como um instrumento técnico de organização do conhecimento produzido pela pesquisa, estabelecendo uma estrutura comum para a leitura de diferentes assentamentos.

A contribuição do instrumento está também na possibilidade de identificar relações entre condições que, quando analisadas isoladamente, poderiam permanecer dispersas. Informações sobre parcelamento, infraestrutura, renda, topografia ou risco deixam de

constituir registros independentes e passam a compor uma leitura articulada do assentamento. A construção das fichas demonstrou, nesse processo, que caracterizar um território envolve selecionar informações, estabelecer conexões entre elas e produzir uma síntese capaz de representar sua complexidade sem reduzi-la a um único aspecto.

3.2 A experiência na favela da África

Na favela da África, a leitura do assentamento foi construída a partir da relação entre informações cartográficas, observação de campo e levantamento de dados históricos, socioeconômicos e ambientais. O estudo partiu da inserção do assentamento na estrutura urbana de Natal e avançou para características específicas da ocupação, permitindo relacionar a favela às condições de seu entorno e aos processos mais amplos de formação da cidade.

Essa perspectiva contribuiu para situar a favela da África no processo histórico de constituição das favelas em Natal. A formação desses territórios integra a urbanização do município e se relaciona às transformações ocorridas em sua estrutura urbana ao longo do tempo (SOARES et al., 2024). A leitura territorial desenvolvida na disciplina permitiu aproximar essa dimensão histórica de condições observadas no presente, relacionando características da ocupação atual a processos mais amplos de formação do assentamento.

As atividades de campo ampliaram a leitura obtida a partir das bases cartográficas utilizadas. Foram observadas condições de infraestrutura, características das vias, questões relacionadas à drenagem e ao descarte de resíduos, formas de apropriação dos espaços e elementos ambientais e paisagísticos. A observação direta permitiu qualificar situações que não poderiam ser apreendidas integralmente apenas pelas representações cartográficas, acrescentando informações sobre usos, condições e relações espaciais percebidas no cotidiano da favela.

A diferença entre essas fontes foi relevante para o próprio processo de leitura. Enquanto a cartografia permitiu reconhecer padrões de ocupação, organização espacial e relações de inserção urbana, o campo possibilitou identificar particularidades e situações que exigiam maior interpretação. A combinação desses procedimentos mostrou que a representação cartográfica constitui uma etapa importante do diagnóstico, mas não esgota as características de um assentamento, sobretudo quando estão em questão usos, condições de infraestrutura e formas de apropriação do espaço.

Os dados históricos e socioeconômicos foram posteriormente relacionados às condições espaciais observadas. As análises de habitabilidade incorporaram questões referentes à densidade construtiva, às condições ambientais e às situações de risco, enquanto as sínteses territoriais organizaram as principais fragilidades e potencialidades identificadas na favela. Com isso, a leitura deixou de tratar cada aspecto separadamente e passou a considerar suas relações na configuração do assentamento.

Figura 2 - Síntese das leituras territoriais desenvolvidas na favela da África no âmbito da disciplina Tópicos Especiais em Projeto Urbano e Territorial 03.

Fonte: Acervo da autora, 2026.

A produção dos materiais gráficos também teve papel importante nessa etapa. Transformar informações heterogêneas em mapas, esquemas e sínteses exigiu selecionar conteúdos, definir relações entre diferentes escalas e estabelecer formas de representação capazes de comunicar os principais aspectos identificados. A elaboração dessas sínteses funcionou, portanto, como parte da própria análise: ao organizar visualmente as informações, tornou-se possível reconhecer relações entre problemas, condicionantes e potencialidades que apareciam dispersos nas etapas anteriores.

3.3 Aproximações entre os procedimentos de leitura

A comparação entre as atividades desenvolvidas na disciplina e as dimensões reunidas nas Fichas de Caracterização evidencia a recorrência de determinados temas e procedimentos de análise. Inserção urbana, parcelamento, infraestrutura, condições socioeconômicas, aspectos ambientais, habitabilidade e risco aparecem nos dois processos, ainda que com diferentes níveis de aprofundamento e finalidades.

Quadro 1 — Aproximações entre procedimentos de leitura territorial da disciplina e dimensões das Fichas de Caracterização.

Fonte: Elaborado pela autora, 2026

As correspondências apresentadas no quadro não significam equivalência entre os dois processos. A disciplina trabalhou essas questões a partir de um estudo de caso e de exercícios orientados à leitura e à elaboração de propostas, enquanto as fichas foram estruturadas para reunir informações de diferentes assentamentos em uma base comum de caracterização. A aproximação ocorre, portanto, principalmente nas operações de leitura que antecedem os produtos finais: localizar, identificar características, relacionar informações, representar condições territoriais e produzir sínteses.

Algumas dimensões aparecem de maneira mais direta nos dois processos. A inserção urbana e o parcelamento, por exemplo, constituem bases para compreender a configuração espacial dos assentamentos; infraestrutura, condições ambientais e risco permitem qualificar as situações que interferem em sua habitabilidade; e os dados históricos e socioeconômicos ajudam a situar essas características dentro dos processos de formação e transformação do território. A recorrência desses temas indica que a caracterização depende de sua leitura conjunta, e não apenas de levantamentos isolados.

As diferenças de finalidade também são relevantes. Na disciplina, as informações foram produzidas e interpretadas em um percurso associado à elaboração de cenários e propostas urbanísticas. Nas fichas, a prioridade está na sistematização e padronização das informações para caracterizar diferentes assentamentos. O mesmo dado, portanto, pode assumir funções distintas conforme o contexto em que é utilizado: servir à formulação de uma proposta específica ou integrar uma base de caracterização mais ampla.

A aproximação entre as experiências permitiu observar essas diferenças com maior clareza. O exercício desenvolvido na disciplina apresentou uma situação concreta de levantamento, interpretação e síntese, enquanto a pesquisa colocou esse repertório em contato com um instrumento pensado para organizar informações em escala mais abrangente. Essa relação contribuiu para compreender que a qualidade de uma

caracterização territorial depende tanto das informações disponíveis quanto das operações utilizadas para selecioná-las, relacioná-las e representá-las.

3.4 O redirecionamento do plano de trabalho

O percurso realizado diferiu das atividades previstas inicialmente no plano de trabalho. A proposta previa a participação em oficinas de cartografia social e no desenvolvimento de tecnologias sociais junto às comunidades, com atuação vinculada às metodologias participativas. Essas atividades, contudo, não foram realizadas durante o período analisado.

As ações concentraram-se na construção das Fichas de Caracterização e em atividades de formação relacionadas à leitura territorial. Com isso, o trabalho voltou-se principalmente à organização, interpretação e representação de informações sobre os assentamentos, mantendo relação com os objetivos gerais da pesquisa.

Essa alteração modificou a natureza das atividades desenvolvidas. O planejamento inicial privilegiava a produção de conhecimento por meio da interação direta com as comunidades, enquanto as ações realizadas durante o período estiveram mais relacionadas à organização e análise de informações territoriais. As duas dimensões possuem procedimentos e formas de produção de conhecimento distintas, mas podem integrar etapas complementares de uma pesquisa voltada à compreensão dos assentamentos informais.

Mesmo sem o desenvolvimento das atividades participativas previstas, a sistematização realizada permitiu consolidar procedimentos importantes para etapas posteriores do projeto. A organização de informações espaciais, históricas, socioeconômicas e ambientais fornece uma base para aprofundar a leitura dos assentamentos e pode contribuir para que futuras atividades participativas partam de um conhecimento territorial previamente estruturado.

3.5 Pesquisa, ensino e formação metodológica

A articulação entre a iniciação científica e a experiência desenvolvida na disciplina aproximou duas formas de produção de conhecimento sobre os assentamentos informais. Enquanto a pesquisa possibilitou acompanhar a construção de um instrumento voltado à sistematização de informações, a disciplina proporcionou situações de levantamento, análise, representação e discussão de um território específico.

Essa aproximação contribuiu para compreender a caracterização territorial como um processo que envolve diferentes fontes e escalas de informação. Mapas, dados socioeconômicos, observação de campo e análise das condições espaciais assumem papéis complementares na construção de uma leitura sobre os assentamentos. O trabalho desenvolvido mostrou também que a produção de uma síntese territorial depende de procedimentos de seleção e interpretação, já que nem toda informação disponível possui o mesmo peso na compreensão de determinada situação.

A experiência articulada entre pesquisa e ensino permitiu ainda aproximar dois momentos distintos do trabalho com o território: a produção de informações e sua

organização em instrumentos de leitura. A disciplina possibilitou experimentar procedimentos de análise a partir de um estudo de caso, enquanto a elaboração das fichas colocou em evidência a necessidade de estruturar essas informações de maneira comparável e sistemática. Essa relação ampliou o entendimento sobre as etapas que antecedem a formulação de diagnósticos e propostas de intervenção.

No processo formativo, o principal resultado esteve na ampliação do repertório necessário à leitura territorial e na compreensão das relações entre levantamento, representação e análise. A experiência desenvolvida durante o período estabeleceu uma base para a continuidade da pesquisa e para a futura incorporação das metodologias participativas previstas no projeto.

Conclusão

O percurso analisado apresentou uma alteração em relação ao plano de trabalho inicialmente estabelecido, uma vez que as oficinas de cartografia social e as atividades participativas previstas não foram realizadas durante o período considerado. As ações desenvolvidas concentraram-se na construção das Fichas de Caracterização dos Assentamentos Populares e em atividades de formação relacionadas à leitura territorial, mantendo relação com os objetivos gerais do projeto “Cartografia em conflito”.

As fichas resultaram em um instrumento de sistematização que reúne informações territoriais, morfológicas, socioeconômicas, ambientais e de infraestrutura em uma estrutura comum de caracterização. Já a experiência na disciplina Tópicos Especiais em Projeto Urbano e Territorial 03 possibilitou exercitar procedimentos de mapeamento, observação de campo, análise das condições territoriais e elaboração de sínteses a partir do estudo da favela da África.

A comparação entre essas experiências revelou convergências nas dimensões utilizadas para compreender os assentamentos, ainda que os dois processos apresentem finalidades e formas de desenvolvimento distintas. A aproximação entre pesquisa e ensino contribuiu para ampliar a compreensão sobre os procedimentos de levantamento, organização, análise e representação das informações territoriais.

O período analisado demonstra, portanto, que o desenvolvimento da iniciação científica contribuiu para consolidar conhecimentos relacionados à caracterização e à leitura dos assentamentos informais, mesmo diante da alteração das atividades inicialmente previstas. As experiências realizadas constituem uma base para a continuidade do projeto e para a futura incorporação das metodologias participativas previstas no plano de trabalho.

Referências

SILVA, Madianita Nunes da; CARDOSO, Adauto Lucio; DENALDI, Rosana (orgs.). Urbanização de favelas no Brasil: trajetórias de políticas municipais. Rio de Janeiro: Letra Capital, 2022.

SOARES et al. Entre casebres, cabanas e choupanas: vestígios e indícios da origem da favelização em Natal (RN), 1890-1930. In: 18º SHCU – Seminário de História da Cidade e do Urbanismo, Natal, 2024.

Anexos



Figura 1 - Ficha de Caracterização dos Assentamentos Populares.



Figura 2 - Síntese das leituras territoriais desenvolvidas na favela da África no âmbito da disciplina Tópicos Especiais em Projeto Urbano e Territorial 03.



Quadro 1 — Aproximações entre procedimentos de leitura territorial da disciplina e dimensões das Fichas de Caracterização.

CÓDIGO: HS1472

AUTOR: JULIA MARIA DE ARAUJO LUCENA

ORIENTADOR: EDJA BEZERRA FARIA TRIGUEIRO

TÍTULO: A casa das sete mulheres: um estudo sobre formas do morar intergeracional na produção acadêmica da UFRN

Resumo

Este artigo aborda relações entre configuração espacial e modos de morar em residências intergeracionais, buscando contribuir para estreitar uma lacuna identificada na produção acadêmica sobre moradias no Repositório Institucional da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Dentre 127 trabalhos acadêmicos sobre o morar, examinados nesta e em etapas anteriores da corrente pesquisa, foi verificado que apenas dois textos tratam da co-habitação intergeracional.

Busca-se examinar diferentes configurações com o propósito de relacioná-las a propriedades espaciais que podem favorecer ou restringir possibilidades de convivência, circulação e privacidade entre diferentes gerações. Para isso, são analisados cinco casos de moradias norte-rio-grandenses, selecionados a partir do Repositório Institucional da UFRN e do acervo do grupo de pesquisa Morfologia e Usos da Arquitetura (MUsA/UFRN).

A análise configuracional foi realizada por meio da Sintaxe do Espaço (Hillier; Hanson, 1984), com apoio do software Santanagraph (Santana, 2026), mediante a construção e interpretação de grafos planares e justificados. Os resultados evidenciam que as moradias analisadas conformam estruturas diversas de habitação intergeracional, apresentando diferenças quanto a propriedades espaciais, mais ou menos, favoráveis a modos de convívio, talvez pautadas por preferências quanto ao incentivo ao encontro ou esquivança, exposição ou reclusão.

Palavras-chave: Modos de morar. Intergeracional. Sintaxe do Espaço. Morada brasileira.

TITLE: The house of the seven women: a study of intergenerational forms of living as addressed in the academic production of the UFRN

Abstract

This article addresses relations between spatial configuration and ways of living in intergenerational residences. It seeks to narrow a gap found in the academic production concerning dwellings in the Institutional Repository of the Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Amongst the 127 academic studies of housing, examined in this and in previous stages of this research, only two address intergenerational co-housing.

The aim here was to examine different spatial configurations in the light of properties that can foster or constrain opportunities for social interaction, circulation, and privacy among different generations. For this purpose, five cases were selected from the Institutional Repository of UFRN and from the array of cases studied or supervised by components of the MUsA (Morphology and Uses of Architecture) research group (MUsA/UFRN).

Configurational analysis was conducted using Space Syntax (Hillier & Hanson, 1984) and supported by Santanagraph software (Santana, 2026), involving the construction and interpretation of planar and justified graphs. The results demonstrate diverse spatial structures within cases of intergenerational living, disclosing variations in spatial properties more or less favorable to modes of life associated with preferences concerning encounter or avoidance, exposition or reclusion.

Keywords: Modes of living. Intergenerational. Space Syntax. Brazilian dwelling.

Introdução

Em etapas anteriores do projeto de pesquisa “A forma da norma e os usos da forma: arquitetura e modos de convívio em edifícios e espaços públicos”, o enfoque foi a produção acadêmica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e em trabalhos disciplinares sobre moradas brasileiras disponíveis no acervo do grupo de pesquisa Morfologia e Usos da Arquitetura (MUsA/UFRN), resultando na produção de artigos sobre a flexibilidade na configuração dos espaços domésticos.

Revisitando os dados sobre as fontes examinadas ao longo da pesquisa, reunindo 127 textos acadêmicos que versam sobre o morar, encontrados no Repositório Institucional da UFRN, foi identificado que apenas dois destes abordam o morar intergeracional,

tema tão presente em nosso cotidiano. Portanto, a quase ausência de discussões sobre esse modo de morar cativou-nos e motivou-nos a iniciar um ensaio de reconhecimento acerca do material disponível, almejando ampliar e contribuir para a discussão a partir de procedimentos analíticos da Sintaxe do Espaço (Hillier; Hanson, 1984).

Conforme Tramontano (1997), desde os anos 1960, o perfil da população brasileira vem se alterando de maneira clara, seja por fatores econômicos, tecnológicos e culturais. Tem-se a dissolução do núcleo familiar e do estilo de vida urbano como um fator crucial para a intensificação desta mudança. Em um contexto mais recente, a pandemia de SARS-CoV-2 funcionou como "acelerador de futuros". Isso porque a quarentena da COVID-19, ao transferir trabalho e ensino para o lar, redefiniu as funções da habitação, exigindo maior adaptabilidade (Silva, 2022). Somando-se a isso, deve-se considerar muitos dos casos desta época de retorno dos filhos adultos às casas dos pais idosos e a forte tendência de moradia compartilhada entre jovens, seja por questões financeiras do período ou de solitude. A postergação da maternidade para idades mais avançadas, o aumento do número de separações e divórcios e a emancipação de todos ou grande parte dos membros das famílias também são fatores a serem levados em consideração (Góis, 2015). Todos estes rearranjos dos últimos anos, impulsionados pela pandemia, trouxeram à tona os termos co-housing e co-living.

Presente em dois dos textos acadêmicos listados no banco de dados da pesquisa, parte do Repositório Institucional da UFRN, o co-living é uma adaptação do co-housing (tema presente em três textos acadêmicos no Repositório Institucional da UFRN), movimento dinamarquês da década de 1970, conduzido por grupo de pessoas que ansiavam por comunidade, no qual famílias habitavam moradias individuais, mas compartilhavam espaços de convivência e atividades (McCamant e Durrett, 1994 apud Bezerra, 2015). O co-living surge da confluência de diversos fatores mundiais, e, entre eles, está a crise na habitação (Bezerra, 2015). Este modo de morar consiste em uma unidade de moradia compartilhada para pessoas com intenções afins.

Apesar de comumente compreendidos como sinônimos, aqui estudaremos casos de moradias que abrigam, sob o mesmo teto, pessoas de diferentes gerações, de uma mesma família ou não, sendo o idoso uma referência, dentro do entendimento de morar intergeracional.

A pertinência do estudo por este viés se justifica pela contemporaneidade do tema, em contraste com sua escassa presença como objeto de estudo privilegiado em nossa instituição. Reforça sua escolha a frequência de contato da autora com uma situação de coabitação intergeracional. Aqui avançamos no tema ao incluir exercícios de análise sintática do espaço (Hillier; Hanson, 1984), mediante a representação e quantificação da estrutura espacial de seis casos de moradias norte-rio-grandenses.

Metodologia

O método de estudo escolhido foi a análise configuracional, realizada com o apoio do software Santanagraph (Santana, 2026), para a construção e visualização de grafos planares, não direcionais e não ponderados, sobre seis plantas arquitetônicas

simplificadas, e de grafos justificados, demonstrando propriedades espaciais facilitadoras ou não de determinados modos de habitar.

Nos casos escolhidos, distintas gerações co-habitam o mesmo edifício, e os estudos fazem parte do Repositório Institucional da UFRN ou do acervo da MUsA, tendo sido desenvolvidos no âmbito da produção acadêmica da nossa instituição. Após a seleção, prosseguiu-se com a análise sintática do espaço (Hillier; Hanson, 1984).

Resultados e Discussões

OS CASOS:

1. RESIDÊNCIA CABRAL, a casa das sete mulheres
O exemplar que inicia a breve coletânea de estudos de caso aqui exposta intitula este artigo e corresponde à residência da autora. Na casa, co-habitam sete mulheres pertencentes a quatro gerações, entre moradoras fixas e ocupantes itinerantes. Construída na década de 1960, em Parnamirim, Natal/RN, a atual configuração é fruto de diversas reformas e ampliações realizadas pela própria família, frente às demandas de cada fase da vida das sete mulheres que nela residem.

Os grafos planar e justificado (Figura 1) representam o arranjo espacial da casa percebido por um morador com autoridade para entrar por todos os acessos: pela área (A), pelo quintal (QT) e pela cozinha (CZ). O exterior (EX) é aqui representativo do "lado de fora". Dentre os dezesseis espaços, está aqui a presença de três espaços de circulação (C) e doze de permanência. O grafo justificado mostra uma estrutura rasa, com cinco níveis de profundidade, e três alternativas de percurso (anéis) entre espaços de convivência entre moradores (servidos) e entre estes e visitantes, compostos por nove espaços. Seis espaços são terminais, um de passagem, sete pertencem a um só anel e dois pertencem a mais de um anel.

Observa-se que a sala de jantar (SJ) é o cômodo que possui maior integração, o que indica uma maior possibilidade de agrupamento de pessoas ou de encontros. O setor predominante da residência é o íntimo.

2. RESIDÊNCIA MOEMA
Localizada em Candelária, Natal/RN, a unidade doméstica unifamiliar foi planejada e projetada sem a participação da família, sendo co-habitada por cinco gerações (Góis, 2015). Os grafos planar e justificado (Figura 2) evidenciam a presença mínima de espaços de circulação (C), apenas um dentre quinze espaços. Do total, há dez espaços de permanência, dois espaços de transição, a circulação (C) e a garagem (G), que pode ser utilizada como de permanência, e dois espaços considerados como ambientes nem de transição nem de permanência: o despejo (DS) e o closet (CL).

O grafo justificado mostra uma estrutura com sete níveis de profundidade, contando com apenas um anel, composto por quatro espaços. Cinco espaços são terminais, seis são espaços de passagem e quatro pertencem a um único anel. Em relação à integração,

a sala (S) é o espaço mais integrado e o despejo (DS) o menos integrado. O setor predominante da residência é o íntimo.

3. RESIDÊNCIA ALMEIDA

Situada em Monte Alegre/RN, a residência é co-habitada por quatro gerações e não dispõe de informações acerca da participação ou não da família no seu projeto ou adaptações (Almeida, 2025). Os grafos planar e justificado (Figura 3) evidenciam a ausência de espaços de circulação (C) dentre dezesseis espaços. Destes, dois espaços são aqui considerados como ambientes nem de transição nem de permanência: o depósito (DP) e a despensa (D); dez são espaços de permanência e um é espaço de transição, o hall (H), que também pode ser utilizado como de permanência.

Identificou-se, no grafo justificado, a presença de oito anéis, compostos por nove espaços, cinco espaços terminais, um espaço de passagem, cinco espaços que pertencem a apenas um anel e cinco espaços que pertencem a mais de um anel. A estrutura é rasa, com apenas quatro níveis de profundidade. No que diz respeito à integração, o espaço mais integrado é a sala de jantar (SJ) e menos integrado é um dos banheiros (B). O setor predominante da residência é o íntimo.

4. RESIDÊNCIA TREVO

Planejada sem a participação da família, a residência Trevo localiza-se no bairro do Tirol, Natal/RN, e é co-habitada por três gerações. Esta possui nove espaços, sendo oito de permanência e apenas um de transição. A partir dos grafos planar e justificado (Figura 4), percebe-se uma estrutura rasa, com apenas três níveis de profundidade, e formato de árvore. Em relação aos espaços, sete são terminais e dois são de passagem.

Ao olhar para a integração, o espaço mais integrado é a circulação (C), seguido pela sala de jantar (SJ). Além disso, o setor predominante é o íntimo.

5. RESIDÊNCIA EMERENCIANO

Por fim, há de se estudar um “projeto arquitetônico de uma residência unifamiliar intergeracional que possa ser utilizada por uma família em qualquer fase do seu ciclo familiar” (Emerenciano, 2014). O layout escolhido para este estudo foi o três, pensado e projetado para o momento de co-habitação de três gerações em Ponta Negra, Natal/RN.

Os grafos planar e justificado (Figura 5 e 6) evidenciam a quase total separação dos setores por pavimento, em que o térreo é composto apenas por área íntima e circulação, enquanto o pavimento superior comporta atividades sociais, íntimas e de serviço, o que resulta numa possível esquivância premeditada. No pavimento térreo, tem-se que o grafo planar possui a forma de árvore, ou seja, o percurso único para cada espaço aumenta a hierarquia e o controle. No pavimento superior, há a presença de um anel composto por cinco espaços. Considerando o total dos dois pavimentos, tem-se sete espaços terminais e oito espaços de passagem.

Em relação aos espaços, dos dezenove, apenas dois são de circulação (C), dezessete são de permanência e um dos espaços é considerado como ambiente nem de transição nem de permanência: o closet (CL). O setor predominante da residência é o íntimo.

DISCUSSÃO:

A leitura dos cinco estudos de caso evidencia diferentes formas de organização da co-

habitação intergeracional. Embora todas as residências apresentem predominância do setor íntimo, suas características sintáticas diferem quanto à profundidade, conectividade, quantidade de anéis e distribuição dos espaços de circulação e permanência, o que permite compreender como a arquitetura doméstica estrutura, em maior ou menor grau, as possibilidades de encontro e de controle entre as gerações.

As residências Cabral, Almeida e Trevo apresentam estruturas relativamente rasas, respectivamente com cinco, quatro e três níveis de profundidade. Na perspectiva da análise sintática do espaço (Hillier; Hanson, 1984), uma estrutura mais rasa tende a indicar maior proximidade espacial entre os ambientes, reduzindo a distância entre os diferentes domínios da casa. Entretanto, isso não deve ser interpretado como maior convivência, pois a proximidade espacial cria potencial de interação, mas não determina o comportamento dos moradores. Já a residência Moema constitui o caso mais contrastante, apresentando sete níveis de profundidade, sugerindo maior hierarquização entre determinados ambientes.

A quantidade de anéis talvez seja uma das variáveis mais interessantes para compreender as diferenças entre os modos de morar intergeracionais. A residência Almeida, caso com maior conectividade, apresenta oito anéis, envolvendo nove espaços, e cinco espaços pertencem a mais de um anel, o que significa que há diversas alternativas de percurso entre os ambientes, permitindo conjecturar que diferentes gerações conseguem realizar suas atividades sem necessariamente compartilhar todos os mesmos trajetos. A residência Cabral também apresenta uma estrutura anelar, com três alternativas de percurso, portanto, sua configuração é relativamente permeável, embora menos complexa que a Almeida.

Moema, por sua vez, possui apenas um anel, composto por quatro espaços. Já a residência Trevo apresenta uma configuração em árvore, sem anéis, em que cada espaço possui um percurso único, aumentando a hierarquia da configuração. Emerenciano apresenta uma situação híbrida, em que o térreo possui estrutura em árvore, enquanto o pavimento superior apresenta um anel de cinco espaços.

Outro ponto de convergência é a recorrência da sala de jantar como espaço de maior integração. Na residência Cabral, a sala de jantar é o espaço mais integrado, bem como em Almeida. Na residência Trevo, a circulação ocupa o primeiro lugar, seguida pela sala de jantar. Tem-se, então, que a sala de jantar atua como um espaço focal de articulação e convergência cotidiana entre as gerações:
“Além dos quartos, uma sala de estar e jantar, integrada com multifunção: para as refeições, para as crianças brincarem, para jogos de videogame, para uso dos notebooks e como espaço para o culto religioso…” Góis (2015) sobre a residência Moema.

A configuração da residência Moema também pode sugerir que não necessariamente a intergeracionalidade depende de uma forte integração espacial. Ao contrário, a co-habitação de cinco gerações pode demandar mecanismos de distanciamento, hierarquia e privacidade. Nesse sentido, a alta profundidade pode ser interpretada não apenas como uma barreira à convivência, mas como uma possível estratégia de acomodação da diversidade de modos de vida, permitindo que diferentes gerações compartilhem o mesmo domicílio sem necessariamente compartilhar permanentemente os mesmos espaços. Já a residência Emerenciano é ainda mais explícita nesse aspecto, pois, diferentemente das demais, trata-se de um projeto concebido deliberadamente para a

condição intergeracional, em que a organização vertical praticamente separa os setores por pavimento.

Conclusão

A análise dos grafos planares e justificados evidencia que as residências intergeracionais investigadas não conformam um modelo único, mas diferentes estratégias de articulação entre convivência, proximidade, circulação e privacidade. Embora os casos apresentem predominância do setor íntimo, suas estruturas sintáticas variam quanto à profundidade, conectividade e quantidade de anéis, indicando que a intergeracionalidade pode ser espacializada por meio de configurações distintas. Assim, o morar intergeracional parece constituir uma condição de co-habitação que pode ser acomodada por diferentes organizações domésticas.

A residência Almeida apresenta a maior conectividade do conjunto, expressa pela presença de oito anéis e por uma estrutura rasa, oferecendo diversas possibilidades de percurso entre os ambientes. Cabral também apresenta uma configuração relativamente rasa e anelar, tendo a sala de jantar como espaço de maior integração, o que lhe confere potencial de articulação entre os diferentes ambientes de convivência. Esses casos sugerem configurações com maior permeabilidade espacial, nas quais a proximidade entre os ambientes pode favorecer diferentes possibilidades de encontro e circulação, sem, contudo, determinar o comportamento dos moradores.

Moema constitui o caso de maior profundidade, com sete níveis e apenas um anel, revelando uma estrutura mais hierarquizada. Sua configuração permite considerar que a coabitação de cinco gerações não depende necessariamente de elevada integração espacial, podendo também envolver relações de distância e gradação entre os ambientes. Trevo, por sua vez, apresenta a configuração mais simples, organizada em árvore e sem anéis, enquanto Emerenciano se diferencia por ter a intergeracionalidade como premissa explícita de projeto, utilizando a separação vertical dos setores como estratégia de organização das diferentes esferas de uso. A diversidade encontrada entre os casos reforça, portanto, que proximidade e convivência não são equivalentes, assim como profundidade e isolamento não devem ser compreendidos automaticamente como ausência de interação.

Nesse sentido, reconhece-se que os indicadores sintáticos expressam potenciais de uso e interação, não podendo, isoladamente, determinar práticas ou comportamentos dos moradores. A ampliação desta investigação, com maior número de casos e associação entre análise configuracional, observação dos usos e relatos dos moradores, poderá aprofundar a compreensão de como diferentes gerações negociam, no espaço doméstico, as demandas simultâneas de convivência e autonomia.

As reflexões apresentadas neste breve artigo foram possíveis graças ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio das bolsas que contribuíram para o desenvolvimento das pesquisas aqui mencionadas.

Referências

ALMEIDA, Gabriela. Representação e quantificação em grafos justificados. Estudo morfológico de moradias apresentado por alunos (Morada Brasileira). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2025.

BEZERRA, Jéssica Bittencourt. Cohousing: uma alternativa de habitat coletivo. 2015. 146f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

EMERENCIANO, Anna Paula Santos. Casa Intergeracional: um lar para toda a vida. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo), Departamento de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

GÓIS, Lúcia Helena Costa de. Da casa grande ao condomínio fechado: o que mudou nas formas e modos de morar da família intergeracional no Nordeste e Sudeste do Brasil? 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

HANSON, Julienne. Decoding homes and houses. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

HILLIER, Bill; HANSON, Julienne. The social logic of space. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

LUCENA, Júlia Maria de Araújo. Moradias brasileiras na produção acadêmica da UFRN: explorando a ideia de flexibilidade na configuração dos espaços domésticos. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UFRN, 36, 2025, Natal. Anais [...] Natal: UFRN, 2025. Disponível em: https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1-mix2AOH0qt5064cT4dgESiNC60pSNmx. Acesso em: 16 out. 2025.

SANTANA, Ugo Dantas de. Santanagraph. 2026. Programa de computador versão 1.1.2. Disponível em: https://www.ugosantana.com/software/santanagraph.

SILVA, Claryana Rodolfo de Albuquerque Costa e. Novas tendências do morar em apartamentos: proposta arquitetônica de estudo preliminar de um edifício com enfoque em flexibilidade e sanitarismo. 2022. 150 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura) - Departamento de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

TRAMONTANO, Marcelo. Uma nova casa brasileira. Folha de S.Paulo, São Paulo, 9 nov. 1997. Caderno Imóveis – Opinião. Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/fsp/imoveis/ci091105.htm. Acesso em: 29 jul. 2025.

Anexos



Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4



Figura 5



Figura 6

CÓDIGO: HS1489

AUTOR: MAYSE DE OLIVEIRA BEZERRA

ORIENTADOR: GEORGE ALEXANDRE FERREIRA DANTAS

TÍTULO: UM TEMPLO MODERNO PARA UMA NATAL MODERNA: As representações do processo de construção da Catedral Metropolitana nos discursos jornalísticos (1930-1973)

Resumo

Este trabalho analisa o processo de construção da Catedral Metropolitana de Natal, utilizando o papel da imprensa, em especial dos jornais, ao longo do longo processo de concepção e construção da Nova Igreja. Com base na abordagem da História Cultural Urbana, debate-se que os periódicos atuaram não apenas como veículos informativos, mas como agentes ativos na produção de sentidos, ao moldarem a opinião pública, registrarem disputas de imaginários, expressarem expectativas em torno da cidade e do edifício projetado, além de funcionarem diretamente como instrumentos de arrecadação de recursos para a concretização do projeto. O recorte temporal compreende as décadas de 1930 a 1973, período no qual se concentra a maior parte dos registros sobre a obra. As fontes compulsadas na Hemeroteca Digital foram examinadas sob o método de Letícia Krilow (2019) para análise de representações em jornais. Com isso, o trabalho apresenta os diferentes projetos divulgados pela imprensa, desde propostas de inspiração neogótica e neorromânica até a consolidação de uma solução modernista, concluída na década de 1980. E debate o modo em que esses projetos foram abordados pela imprensa da época, evidenciando os desafios e os sentidos atribuídos ao templo.

Palavras-chave: Catedral Metropolitana de Natal; jornais; arquitetura; história urbana

TITLE: A MODERN TEMPLE FOR A MODERN NATAL: Representations of the construction process of the Metropolitan Cathedral in journalistic discourses (1930-1973)

Abstract

This paper analyzes the construction process of the Metropolitan Cathedral of Natal, focusing on the role of the press—especially newspapers—throughout the extensive conception and construction phases of the New Church. Grounded in the Urban Cultural History approach, it argues that periodicals acted not merely as informational vehicles, but as active agents in the production of meaning. They shaped public opinion, recorded

disputes over imaginaries, and expressed expectations regarding both the city and the projected building, while also functioning directly as fundraising instruments to realize the project. The timeframe spans from the 1930s to 1973, a period that concentrates the majority of the records concerning the construction. The sources consulted in the Hemeroteca Digital (Digital Newspaper Archive) were examined using Letícia Krilow's (2019) method for analyzing representations in newspapers. Consequently, this work presents the various projects publicized by the press, ranging from neo-Gothic and neo-Romanesque inspired proposals to the consolidation of a modernist solution completed in the 1980s. Finally, it discusses how these projects were covered by the press at the time, highlighting the challenges and the meanings attributed to the temple

Keywords: Metropolitan Cathedral of Natal;newspapers; architecture;urban history

Introdução

O processo de construção da Catedral Metropolitana da cidade de Natal, capital do Rio Grande do Norte, foi em grande parte registrado pelos periódicos locais, que, até o momento desta pesquisa, constituem a principal fonte de informações sobre o tema. Esses registros revelam que a construção da Catedral Metropolitana não se limitou a uma estrutura de alvenaria e concreto; constituiu-se como um campo de disputas simbólicas e materiais que demonstravam os anseios de modernização da capital potiguar ao longo do recorte de 1930 a 1975. Os jornais, para além de um veículo de comunicação e informação, podem ser utilizados como fontes históricas. Por serem produzidos para circulação imediata, constantemente atualizados, descartados e renovados, registram diferentes etapas dos acontecimentos, sendo assim, sensíveis ao tempo e ao contexto de sua publicação. Ou seja, os jornais não nascem para servir à pesquisa histórica, mas sim como agentes constitutivos do social, carregados de historicidade, peculiaridades e intencionalidades próprias, servindo assim como fontes que podem ajudar a aclarar os condicionantes políticos, ideológicos e sociais que ditaram a formulação de pautas, a seleção de argumentos e o destaque dado a determinados discursos em detrimento de outros. Nesse contexto, os jornais não apenas registraram esse processo por meio das informações divulgadas aos leitores, mas também atuaram como agentes ativos na construção de sentidos, ao moldarem opiniões e, em alguns casos, colaborarem diretamente com a iniciativa, como com a divulgação das campanhas de arrecadação de recursos financeiros. Assim, este relatório adota a imprensa periódica como fonte central para investigar o processo de construção da catedral metropolitana e como foi representada pela imprensa, seus jornalistas, intelectuais, articulistas e grupos de interesse. A análise sistemática desse tipo de fonte primária permite-nos mapear e discutir como atuaram como agentes ativos na veiculação de representações sociais e na construção do imaginário coletivo em torno do monumento. A pesquisa documental foi realizada tendo como tema norteador o processo da construção da Catedral Metropolitana do Natal, encontrados em cinco jornais locais vinculados à plataforma Hemeroteca Digital da Biblioteca Nacional. Em seguida, buscou-se olhar o modo em que as notícias sobre esses projetos e construção foram divulgadas pelos jornais, a partir das representações e da perspectiva da História Cultural Urbana. O levantamento de dados ter resultado em diversas representações, estas foram mobilizadas em torno de um evento específico, capaz de evocar sentimentos, ações, críticas e disputas simbólicas, intensificando tensões e conflitos; a

pesquisa apoia-se também na noção de paradigma indiciário e no método de Krilow (2019) sobre jornais, como discutiremos na seção metodologia. O trabalho estrutura-se em três momentos: inicialmente, apresenta-se um breve panorama da imprensa e de como ela atua como fonte para a História Urbana; em seguida, reconstitui-se o processo de concepção dos projetos — do Neogótico ao Modernista; e, por fim, analisa-se como esses processos de concepção e construção do edifício apareceram nas páginas dos jornais, abordando informações, opiniões e estratégias de arrecadação de verbas que transformaram a construção do templo em um trabalho coletivo e um marco da modernidade natalense.

Metodologia

Este estudo tem como objetivo investigar as motivações que levaram à construção de uma nova Catedral em Natal, com foco no processo de construção, de 1930 até 1973, em que vários projetos foram apresentados, debatidos e um foi finalmente escolhido e começou a ser desenvolvido, considerando os fatores políticos, sociais e religiosos associados ao início do empreendimento, à interrupção das obras, à consequente transformação do edifício em ruínas e, por fim, à consolidação da atual Catedral Metropolitana. Adicionalmente, busca-se mapear a cobertura da imprensa acerca da demolição das ruínas da Catedral Neorromânica, identificando os argumentos favoráveis e contrários à sua preservação e/ou continuidade, bem como os discursos que orientaram a escolha do projeto da atual Catedral Metropolitana de Natal. Parte-se do entendimento de que, à medida que as cidades se expandiram, os jornais passaram a desempenhar papel relevante na conformação da opinião pública, ao veicularem interpretações e disputas sobre a produção do espaço urbano e ao permitirem que a população acessasse diferentes narrativas sobre a cidade em acelerada transformação. Os procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa organizam-se em quatro frentes principais: revisão da literatura, levantamento documental, análise de fontes primárias e organização dos dados coletados (em tabelas e linhas cronológicas). Considerando que, a partir dos anos 1940, a sociedade natalense já dispunha de jornais consolidados que registravam informações, noticiavam acontecimentos e incentivavam debates sobre questões político-sociais da cidade, destacam-se, entre esses periódicos, “A Ordem”, “Diário de Natal”, “O Poti” e “A Tribuna do Norte”, cujos acervos estão parcialmente disponíveis em formato digital na Hemeroteca Digital da Biblioteca Nacional, o que dificulta o acesso durante a pesquisa no período de desenvolvimento da pesquisa. Destaca-se o jornal O Poti, criado na década de 1950 no âmbito dos Diários Associados — a mesma cadeia de imprensa responsável pelo Diário de Natal (fundado em 1939 e rebatizado em 1947) —, o qual se consolidou como uma edição especial com circulação semanal aos domingos. Paralelamente, sobressai-se o jornal A Ordem, fundado em 1935 e vinculado à Arquidiocese de Natal, que desempenhou papel relevante nas articulações entre a Igreja Católica e o cenário político regional. A esse panorama soma-se a Tribuna do Norte, fundada em 1950 pelo jornalista Aluízio Alves, que se posicionou como um importante vetor de debate sociopolítico e defesa do desenvolvimento regional. Em conjunto, esses periódicos constituíram os principais veículos para a circulação de ideias, controvérsias e narrativas sobre o cotidiano e o processo de modernização da capital potiguar. Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica estruturada para fundamentar e direcionar a pesquisa, organizada em dois eixos principais. O primeiro eixo aborda o contexto social, a arquitetura religiosa e o fenômeno das ruínas urbanas. Para esse propósito, foram analisadas as seguintes obras:

"Templos modernos, templos ao chão: a trajetória da arquitetura religiosa modernista e a demolição de antigos templos católicos no Brasil" (Silveira, 2011); "Untimely Ruins: An Archaeology of American Urban Modernity, 1819–1919" (Yablon, 2009); “Ruins of Modernity”, (Hell, Schönle, 2010). O segundo eixo concentra-se nos métodos de coleta e interpretação dos materiais analisados, tendo como referencial teórico a História Cultural Urbana. Nesse sentido, foram mobilizadas as seguintes obras: Roger Chartier, "A história cultural: entre práticas e representações" (1990) e "Inscrever e Apagar" (2006); Sandra Pesavento, "Crônica: a leitura sensível do tempo. 1997" (1997); Peter Burke, "Variedades da História Cultural" (2000); Carlo Ginzburg, "Mitos, emblemas e Sinais" (1991); James William Goodwin “Cidades de papel: imprensa, progresso e tradição” (2007); Andrián Gorelik, “Imaginarios urbanos y imaginación urbana” (2004) e Letícia Sabina Wermeier Krilow, “Jornal como fonte e/ou objeto da escrita histórica: proposta metodológica” (2019). E o Paradigma Indiciário de Carlo Ginzburg (1991), utilizado para capturar significados em vestígios e detalhes que poderiam parecer periféricos, como pequenas notas, anúncios e imagens localizadas em páginas finais, permitindo reconstruir as tensões e expectativas da época. Para isso, é realizado o levantamento documental na Hemeroteca Digital da Biblioteca Nacional, consultando os periódicos natalenses O Diário de Natal, O Poti e A Ordem e a República, com a delimitação e a coleta dos periódicos com o recorte temporal que compreende as décadas de 1930 a 1980. Foram utilizadas palavras-chave como "catedral", "catedral metropolitana", "nova catedral" e "igreja nova" para localizar e mapear as ocorrências. A sistematização dos dados, seguindo a proposta de Krilow (2019, p. 3), foi elaborada em um quadro de coleta de informações (tabela dinâmica) para organizar os dados de cada página, registrando o título da matéria, tipo de texto (crônica, notícia, etc.), iconografia, síntese do conteúdo e gestão municipal da época, como mostra na figura 1. Essa abordagem permitiu analisar o tema da Catedral de Natal em três dimensões: como veículo de informação sobre o andamento das obras e seus detalhes e desafios construtivos; como espaço de circulação de opiniões; e como instrumento de mobilização social para arrecadação de recursos. É importante salientar que essas palavras-chave foram utilizadas em diferentes combinações, a fim de otimizar os resultados da pesquisa. Como podemos observar nas imagens a seguir (foto da tabela figura 2). por favor, veja o trabalho completo no link: https://drive.google.com/file/d/19Iku4NPSLA7OzdYTSmZfmq9SGnxc8tu2/view?usp=drive_

Resultados e Discussões

A construção da Catedral Metropolitana de Natal foi amplamente noticiada pela imprensa local e, até o presente estágio do trabalho, esses registros constituem o principal corpus documental sobre o tema. A análise desse conjunto indica que a catedral não pode ser compreendida somente como uma obra material, mas como um campo de disputas simbólicas e materiais, no qual se projetaram diferentes visões e interesses vinculados aos ideais de modernização da capital potiguar. Nesta pesquisa, os jornais são mobilizados não apenas como veículos de comunicação, mas como fontes históricas capazes de registrar, em tempo próximo aos acontecimentos, as marcas do contexto em que foram produzidos. Por sua circulação imediata, atualização contínua e caráter efêmero, os periódicos permitem acompanhar a sucessão de etapas de determinados processos, evidenciando disputas, consensos e expectativas que atravessam a vida social no momento de sua publicação. Ao longo de todo o processo

de idealização e construção da Catedral, a imprensa acompanhou a obra e manteve o público a par dos projetos, das decisões tomadas entre os diferentes envolvidos e das etapas de execução. Grande parte dessas matérias tem caráter informativo, com textos curtos ou notas voltadas a atualizar o leitor sobre o andamento do trabalho. Em janeiro de 1968, por exemplo, o Diário de Natal publicou a nota “Desenho da nova catedral será concluído até sexta-feira”, que, em apenas dois parágrafos, apresentou quem eram os responsáveis pelo projeto e a data de sua apresentação, sem emitir avaliações explícitas. A maior parte das matérias com a função de manter o público atualizado sobre as etapas de concepção e construção da nova catedral começou a aparecer com mais frequência a partir de 1966, quando os trabalhos foram retomados e se consolidou a ideia de um templo funcional, de linguagem moderna. Desde então, os jornais passaram a divulgar continuamente os novos projetos até que se optou pela proposta de Marconi Grevi, anunciada na manchete “D. Nivaldo apresenta projeto da Catedral” (1971). A notícia, acompanhada de um texto breve, sintetizava a solução escolhida, relembrava tentativas anteriores e apontava os próximos passos, publicada na quinta página do *Diário de Natal* entre notas políticas e de obras públicas, sem imagens e sem autoria. Na mesma linha, a decisão de derrubar as ruínas da antiga Catedral Neorromânica foi divulgada com destaque na capa, em uma manchete ilustrada e centralizada: “Catedral começa a cair no dia 22” (1973) (Figura 3). A reportagem, também desenvolvida na quinta página ao lado de conteúdos sobre administração e temas urbanos, apresentava o novo projeto, indicava a comissão responsável por acompanhar a obra e informava as formas de arrecadação de recursos para a construção do templo. Com o início efetivo das obras, o acompanhamento jornalístico tornou-se mais sistemático, como mostra a manchete “Começada a Catedral Metropolitana” (1973). A partir desse momento, multiplicaram-se textos voltados a noticiar o avanço da construção, registrando tantas mudanças no projeto — por exemplo, a sugestão de ampliar a área de estacionamento (Roda Viva: Bomba, 1974, p. 4) (Figura 4) — quanto a conclusão de fases específicas, como em “Catedral agora na fase das pilastras” (1974). Além disso, os jornais também noticiavam a situação financeira da obra, como na matéria “Campanhas da nova Catedral não cobrem despesas enormes” (1976), evidenciando as dificuldades enfrentadas ao longo do processo de construção. Essas publicações reiteradas ressaltam a importância da imprensa na atualização e na informação da população sobre uma obra de interesse coletivo e, ao mesmo tempo, permitem reconstituir os percursos, as decisões e os desafios envolvidos na história desse edifício. 1.2 Breve história da catedral metropolitana de natal A história da Catedral Metropolitana da cidade do Natal antecede os projetos modernistas e até mesmo a proposta da Catedral Neorromânica. A primeira Catedral da cidade foi a Igreja Matriz de Nossa Senhora da Apresentação, erguida em 1599, no bairro da Cidade Alta, próxima ao Marco Zero. Com o passar do tempo, a população e a área urbana cresceram, sobretudo entre os séculos XIX e XX. Nesse contexto, a Igreja Matriz, apesar de ter sido derrubada, reconstruída e reformada em diferentes ocasiões, já não conseguia atender às necessidades dos fiéis. Diante dessa insuficiência espacial, consolidou-se a demanda por um novo templo — inicialmente pensado como uma segunda igreja para a comunidade, que estava em desenvolvimento por todo o território brasileiro. A iniciativa ganhou força com o Padre João Maria, doado em 1849 por Solia Roselli, que obteve da prefeitura o terreno que foi destinado à formação da Praça Pio X, onde se iniciou a construção da chamada “Igreja Nova”. A obra, porém, foi interrompida e, após a morte do padre, em 1905, o projeto de uma nova catedral voltou à pauta sob a liderança do arcebispo Dom Marcolino, seguido por Dom Eugênio Sales e, depois, Dom Nivaldo Monte. Entre avanços e retrocessos, a proposta atravessou as décadas até os anos 1970, período em que sua linguagem arquitetônica foi

sendo revista, alimentando debates que expressam disputas de imaginários e as tensões de uma cidade em modernização. 1.3 História dos projetos pelos periódicos 1.1.1 Catedrais Clássicas (1936-1972) Ao descrever o projeto da Catedral em estilo neogótico (figura 5), o cronista deixa entrever expectativas específicas tanto em relação ao templo quanto à própria configuração futura da cidade. Inicialmente, enfatiza a figura do arquiteto Georges Munier, qualificado como um francês de "valor confirmado", e caracteriza a proposta como dotada de "dimensões grandiosas", alinhada aos grandes templos europeus e, segundo o autor, preservada das interferências do modernismo (França, 1936, p. 8). Essa formulação evidencia a valorização de matrizes arquitetônicas europeias, ao defender um repertório estilístico exógeno e historicamente deslocado do contexto local. Em seguida, França (1936) reitera tal perspectiva ao indicar que a concretização do projeto elevaria o sítio em questão à condição de um dos mais belos centros religiosos do país. Em outra coluna, o cronista fala da carta que recebeu de um leitor, o qual associa a morosidade na construção da nova catedral a uma desconsideração ao padre João Maria, colocando, de certo modo, em questão o compromisso religioso dos responsáveis pela obra. França (1952b) finaliza, citando a carta do leitor que diz "Urge uma providência reparadora do sonho de João Maria, e que, na Catedral que Ele sonhou, idealizou e iniciou, não seja esquecida a homenagem que Ele merece e lhe é devida — um altar para Ele" (França, 1952b, p. 3). Apesar dos esforços institucionais para a materialização do templo, a continuidade da construção foi obstada pela insuficiência de lastro financeiro da arquidiocese, dado que ela era uma arquidiocese recém-estabelecida. Com o passar das décadas, a proposta passou a ser considerada "pesada para o meio ambiente", "deslocada da paisagem brasileira, notadamente no nordeste" (Aguiar, 1955, p. 7) e "não apropriada para nosso meio". (Novo projeto da grandiosa obra em perfeito estilo neo-romano, 1955, p. 8). A partir dos textos de Aderbal de França, percebe-se que a construção da Nova Catedral não era apenas de necessidade prática, mas também como parte do imaginário de modernidade em Natal e como uma questão vinculada à fé e à devoção religiosa. Em um texto publicado em 1955, o cronista Moreira de Aguiar converge: "uma catedral moderna, ampla, imponente, que não apenas sirva para atender ao progresso crescente da cidade, mas, também, para comportar sem atropelos os fiéis que comparecem às solenidades religiosas (…)" (Aguiar, 1955, p. 07). Havia um interesse público para a realização da obra; o autor revela que mesmo os "indiferentes religiosos" estavam dispostos a cooperar com a doação de recursos. Segundo o autor, D. Eugênio Sales consultou profissionais que convergiam: a arquitetura gótica era inadequada para a paisagem da cidade. Então entende-se que, aproximadamente 20 anos depois do projeto apresentado, esse estilo já tinha ficado ultrapassado e esse fator iria guiar o desenvolvimento do novo projeto, que resultará no projeto e construção da Catedral Neorromânica (figura 6), destacada pela mídia como "novo projeto da grandiosa obra em perfeito estilo neo-romano" (Cinco mil pessoas comportará a catedral de Natal, 1955, p. 8). O projeto da Catedral Neorromânica, foi aprovado em 1955 e sua construção começou em 7 de fevereiro de 1956. Os jornais não apresentaram nenhuma opinião desenvolvida sobre o projeto, limitando-se em caracterizá-lo como uma "obra grandiosa". Entretanto, a partir do início das obras, os relatos da imprensa demonstram o quanto que, mesmo inacabada, a edificação começou a fazer parte da rotina da cidade. Em 1957 e 1959 celebraram-se missas em homenagem ao aniversário de morte do Padre João Maria, realizadas na catedral em construção. Ainda em 1959, o artigo "A Catedral-Padroeira e Padre João Maria", escrito por Palmira Wanderley, celebra o avanço das obras da Catedral Metropolitana de Natal na Praça Pio X e faz um apelo ao apoio da comunidade católica e natalense. A autora convoca a população a contribuir financeiramente e com

recursos para a obra, definindo a ajuda como um dever cívico de amor ao progresso de Natal e um ato de devoção à padroeira da cidade, Nossa Senhora da Apresentação, pois "ajudar na construção da nova catedral, cumpre um dever de natalense amigo do progresso de sua terra, porque a futura catedral será um monumento de arte" (A Catedral-Padroeira e Padre João Maria, 1959, p 3) A paralisação das obras criou espaço para alterações na descrição do templo, toma força o imaginário de um outro, "funcional em amplo galpão" (Catedral funcional, 1966, P. 3) e "um novo projeto, mais moderno, mais prático, mais ligeiro e barato" (Arquidiocese vai elaborar nôvo projeto para Catedral,1966, p. 3). Com o senso de retomada dos trabalhos, em matéria publicada em 1967 no Diário de Natal, Dom Nivaldo que D. Eugenio, responsável pela condução da Catedral Neorromânica, teria priorizado a construção de uma "Igreja viva e atuante", "já está construída a catedral de amor, agora vamos construir a catedral de pedra" (Bispo lança campanha da Nova Catedral, 1967, p. 6). Os arcos inacabados da Catedral deixam de ser apresentados como sinal de inaptidão ou fracasso e passam a simbolizar uma Igreja que se fortalecia por outros meios. Durante um período, as ruínas neorromânicas (figura 7), situada em uma das principais praças da cidade, funcionou como um lembrete das falhas dos responsáveis pela construção desse templo e, provavelmente, também do desânimo sobre as expectativas não atingidas. Dessa forma, o projeto de Calixto passou a ser considerado "obsoleto" e acabou sendo arquivado. Com uma linguagem arquitetônica já ultrapassada, a catedral inacabada transformou-se em uma ruína na paisagem urbana (figura 8), que, por fim, seria demolida em 1973. Catedrais modernistas (1967–1972) Sob a influência do governo Juscelino Kubitschek (1956-1961) e da construção de Brasília, a arquitetura moderna consolidou-se no Brasil como um indicador central de progresso. Templos antigos ou de estilos historicistas (como o neorromânico) passaram a ser interpretados como "amarras a um passado colonial de atraso" (Silveira, 2011, p. 8). Em Natal, essa mentalidade levou as autoridades a buscarem uma "solução rápida, econômica e capaz de abrigar mais fiéis", características associadas ao racionalismo técnico do concreto armado. Em oposição, com a decisão se encaminhando em direção a um projeto de linguagem modernista, a crônica de Aderbal de França (A Catedral, 1967, P. 7), classificou a nova ideia como "infeliz". O autor argumenta que a pressa por uma "solução rápida" desonrava o passado. A crítica destaca o espanto de se construir algo com estrutura de "ginásio desportivo" no mesmo local onde o Padre João Maria havia lançado alicerces e colunas monumentais há mais de meio século. Enquanto a Igreja focava na funcionalidade e na economia de tempo e dinheiro, os críticos, como Januário Cicco, lamentavam a perda da mística das "caminhadas triunfais" e do esforço comunitário de outrora, sentindo que a nova de tipologia de arquitetura ignorava as paredes e os sacrifícios que tanto custaram aos pastores anteriores. Em declarações dadas ao TN (Tribuna do Norte), o administrador apostólico da Arquidiocese de Natal, Dom Nivaldo Monte, esclarece que ainda em 1966, o projeto de construção da catedral será "continuado" e será um "projeto mais funcional, moderno e menos dispendioso, além de mais breve" na execução (Construção da Catedral vai recomeçar êste ano, 1966, p. 8). Para com isso, ter uma "capacidade para acolher 8.000 fiéis" (Construção da Catedral vai recomeçar êste ano, 1966, p. 8). Essa situação demonstra a disputa entre dois imaginários sobre a Catedral. O primeiro, adaptado ao tempo, da necessidade de uma construção rápida, prática e funcional de arquitetura moderna, alinhada com o ideal de progresso difundido na época e adequada para suprir a necessidade imediata da população. Por outro, o imaginário da catedral como uma obra de arte, algo místico, que exigia um projeto mais complexo, rebuscado e de maior apelo estético como uma maneira de manter uma tradição. O imaginário da modernidade suscita debates à medida que diferentes projetos de linguagem modernista

passam a ser apresentados, como a catedral que estava sendo desenvolvida em Brasília. O primeiro deles, elaborado por alunos de Engenharia da Faculdade de Pernambuco (figura 9) , foi destacado pelos periódicos como tendo sido bem recebido por setores da Arquidiocese, sobretudo por sua capacidade de dialogar com a paisagem local: “se enquadra na paisagem da cidade, pois dá a ideia de três dunas, como panorama de fundo. E uma das condições da moderna arquitetura é que a obra se enquadre na paisagem”. No entanto, a proposta também foi alvo de críticas, sendo comparada a um “galpão”, além de considerada inadequada à imagem de um “templo católico” (A Catedral, 1968, p. 8) e que tal projeto se assemelhava a um “armazém ou uma quadra de esportes” (Igreja não pode parecer armazém, 1967, p. 8). Contrariamente, o arquiteto Ubiratan Galvão declarou a tribuna que o estilo da resolveria o “problema de falta de espaço existente nas Igrejas de Natal” (Igreja não pode parecer armazém, 1967, p. 8) e o estilo estava dentro das “recomendações do Concilio Ecumênico” (Igreja não pode parecer armazém, 1967, p. 8). Dada a quantidade de críticas recebidas acerca do projeto, o padre Assis Pereira (coordenador do Secretariado de Opinião Pública da Arquidiocese), declarou em entrevista que “catedral sem projeto não pode ser criticada”, destacando que “ninguém, nem mesmo o próprio Bispo, tem a planta em mãos, não havendo, portanto, elementos definitivos para qualquer crítica" (Catedral sem projeto não pode ser criticada, 1967, p. 8). Esse tipo de crítica reaparece de forma mais contundente na posição do arquiteto João Maurício Miranda, que classifica o projeto como “anti-estético”. A tensão se intensifica em 1968, quando o projeto apresentado pelo próprio Miranda (figura 10) , embora caracterizado pela imprensa como “o melhor projeto para a catedral”, é recusado pela Arquidiocese por ser incompatível com o orçamento previsto. Em entrevista, o arquiteto manifestou sua inconformidade ao questionar como se pretendia construir um templo religioso sem “qualquer valor artístico” (Melhor projeto para a Catedral foi recusado pela Arquidiocese, 1968, p. 8). A penúltima proposta para a Catedral foi apresentada em 1971 pelo desenhista Luciano Toscano (figura 11) . O projeto recebeu avaliações positivas, tendo sua qualidade estética elogiada e sendo descrito pela imprensa como uma obra de “grande beleza” (Reportagem: Paulo Macedo, 1971, p. 2a). No entanto, a existência de falhas urbanísticas e arquitetônicas inviabilizou sua execução. Esse projeto é particularmente significativo por evidenciar a centralidade que as questões urbanísticas passaram a assumir no debate sobre a construção da Catedral naquele período. Tal ênfase gerou estranhamento e resistência por parte da população, percepção que pode ser observada na crônica de Aderbal de França escrita no contexto da proposta de Toscano. O cronista manifesta impaciência e desesperança diante da constante postergação da obra e explicita o conflito entre os campos do urbanismo e da religião, ao afirmar: “Discute-se agora outro projeto. Religião versus urbanismo. Vai se enterrar a Catedral. Não subirá para a amplidão do céu, descerá aos apertos da terra” (França, 1971, p. 2). Por fim, em 11 de dezembro de 1972, o projeto de Marconi Grevi (figura 12) é apresentado pelos meios de comunicação como “muito simples”, descrito como “se norteia exclusivamente em três princípios básicos: estrutura, estética, e a função” correspondendo assim ao programa solicitado pela nova liturgia do Vaticano II e os princípios-base da arquitetura moderna (Projeto da Catedral será muito simples, 1972, p. 7a.). A matéria aponta ainda a visão negativa que os ornamentos passaram a assumir nesse contexto “nada de revestimentos caros e materiais supérfluos”. Ainda assim, o texto não deixa de ressaltar as estratégias utilizadas no projeto que se remetem ao simbolismo da religião como “a parte externa da cobertura, incluídas para o alto, simboliza a elevação do homem à Deus, lembrando o infinito” (Projeto da Catedral será muito simples, 1972, p. 7a.). A proposta foi aprovada em maio de 1973. No decorrer do

processo de escolha da nova arquitetura para a Catedral foi possível observar que os restos da catedral neorromânica tornaram-se parte da paisagem em uma cidade que se modernizava, chegando a integrar, inclusive, a decoração natalina de 1971 (Prefeitura concluindo a decoração natalina, 1971, p.3). Essas ruínas podiam ser símbolo de múltiplas lembranças: Ora um projeto que se tornou ultrapassado antes mesmo da sua conclusão, ora de uma expectativa não realizada da construção de um grande centro religioso nacional, como desejava Aderbal de França. Ora um símbolo do sonho do Padre João Maria que por anos parecia desrespeitado; ou ainda do trabalho de D. Eugenio, Bispo Auxiliar no período do início da construção da Catedral Neorromânica. Além disso, adicionou a composição da paisagem urbana de Natal: ruínas da inacabada catedral. É particularmente notável, uma vez que teve uma parte significativa executada e, posteriormente, abandonada: "[...] o prédio da nova Catedral está parado há vários meses. O mato daninho cresce no interior dos muros [...]" (Riqueza e Amizade, 1964, P. 5). Há uma clara mudança de perspectiva ao longo dos vinte anos em que a obra permaneceu paralisada, devido, podemos supor, à maior popularidade da estética modernista e à alteração das diretrizes do Concílio Vaticano II, as paredes levantadas passaram de "majestoso edifício". (A Catedral, 1955, p.7) a um "problema permanente" (O problema permanente, 1972, p. 1) A figura 13 é um "monstrengo construído há alguns anos pela arquidiocese" (Monstrengo sagrado ocupa toda a praça,1972, P. 5a). Em decorrência da maior popularização da estética modernista e da mudança das diretrizes do Concílio Vaticano II, nas políticas desenvolvimentistas do governo de Juscelino Kubitschek e também do crescimento de Natal como cidade. Em junho de 1973, um mês da aprovação do projeto de Marconi Grevi, O Diário de Natal anuncia a demolição das ruínas com a notícia intitulada "Catedral começa a cair no dia 22. por favor, leia o trabalho completo:https://drive.google.com/file/d/19Iku4NPSLA7OzdYTSmZfmq9SGnxc8tu2/view?usp=drive_link

Conclusão

A pesquisa realizada evidencia que a construção da Catedral Metropolitana de Natal, ao longo de várias décadas, extrapolou o campo estritamente técnico da arquitetura e engenharia, afirmando-se como um fenômeno que mobilizou sentimentos e interesses, expressando inclusive interesses conflitantes e disputas dos imaginários sobre a cidade . A imprensa e o jornalismo tradicional desempenharam um papel ativo e estruturante, atuando como agentes na constituição do social, na formulação de modos de viver e pensar o urbano e na recepção e percepção do processo de concepção da Catedral de Natal. As fontes jornalísticas apresentadas não são meros registros passivos do passado, mas "termômetros" e "janelas" que revelam tensões, pautas e condicionantes políticos e ideológicos mobilizados, que se tornaram um veículo de articulação, consolidação e continuidade da memória. A partir do uso do paradigma indiciário (Ginzburg, 1991) e do método proposto por Letícia Krilow (2019), foi possível localizar pistas presentes tanto em manchetes de capa quanto em registros aparentemente secundários, como notas e anúncios nas páginas finais dos jornais. A leitura desses vestígios e da forma como eram apresentados nos periódicos permite reconstituir não só os fatos, mas também os significados atribuídos ao processo, evidenciando desafios, tensões e expectativas que marcaram a concepção e a construção da Catedral Metropolitana do Natal. Ficou claro que a passagem entre estilos arquitetônicos foi acompanhada — e, em alguns momentos, estimulada — pelo debate público, como se expressa nos jornais.

A análise possibilitou perceber uma mudança semântica nas representações do monumento: “obra monumental”, “Majestosa” Catedral Neorromânica, associada a um ideal de progresso eurocêntrico e monumental, ao “Tobogã do Padre”, expressão que sintetiza a recepção popular e midiática diante da pretendida sobriedade do modernismo. Essa transformação na nomenclatura e na imagem pública revela não apenas uma escolha estética, mas também a adequação da Igreja e da sociedade a novos contextos, convertendo aquilo que antes era visto como “monstrengo” em um marco da paisagem natalense. Os jornais registraram o embate entre dois imaginários urbanos e arquitetônicos: o imaginário monumental/tradicional/místico (defendido por intelectuais e críticos que rejeitavam projetos com cara de "ginásio" ou "galpão") e o imaginário moderno/funcional/racional (defendido pela Arquidiocese, alinhada às diretrizes do Concílio Vaticano II e ao ideal de progresso da era JK/Brasília). A atuação dos periódicos A República, O Diário de Natal, O Poti, A Ordem e a Tribuna do RN evidenciou ainda a função mobilizadora da mídia, que apresentou a obra como um “dever moral” coletivo. Ao mesmo tempo, os jornais serviram como espaço para expor tensões entre as expectativas técnicas da crítica e as decisões pragmáticas da instituição eclesiástica, embora debates mais amplos sobre os sentidos simbólicos do empreendimento.

Referências

A CATEDRAL. A República, Natal/RN, 26 ago. 1967, p. 1. Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/031151_01/3036. Acesso em: 19 jan. 2026. AMANHA, DIA NACIONAL DE AÇÃO DE GRAÇAS. O Poti, Natal/RN, 21 nov. 1954, p. 1.Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/DocReader/031151_01/858?pesq=%22cliché%22%20and%20%22construção%22%20and%20%22catedral%22 . Acesso em: 18 de julho de 2026. AGUIAR, Moreira. Nova Catedral. O Diário de Natal, Natal, 06 abr. 1955, p. 7. Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/docreader.aspx?bib=031151_01&pasta=ano%20195&pesq=%2206%20de%20abril%20de%201955%22&pagfis=1770. Acesso em: Acesso em: 18 de julho de 2026. ARQUIDIOCESE DE NATAL. Paróquia da Catedral de Nossa Senhora da Apresentação – Natal. 2022. Disponível em: https://www.arquidiocesedenatal.org.br/post/par%C3%B3quia-da-catedral-de-nossa-senhora-da-apresenta%C3%A7%C3%A3o-natal-1. Acesso em: 18 de julho de 2026. AUXÍLIO MENSAL DE 10 MIL CRUZEIROS PARA AS OBRAS DA NOVA CATEDRAL DE NATAL. O Poti, Natal/RN, 04 nov. 1955, p. 4. Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/031151_01/3280. Acesso em: 18 de julho de 2026. BISPO LANÇA CAMPANHA DA NOVA CATEDRAL. A Ordem, Natal/RN, 26 ago. 1967, p. 6.Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/docreader/DocReader.aspx?bib=764051&pagfis=26644. Acesso em: 18 de julho de 2026. CAMPANHA POPULAR PRÓ CONSTRUÇÃO DA CATEDRAL. O Poti, Natal/RN, 12 out. 1955, p. 8. Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/031151_01/3132. Acesso em: 18 de julho de 2026. CAMPANHAS DA NOVA CATEDRAL NÃO COBREM ENORMES DESPESAS. Diário de Natal, Natal/RN, 06 out. 1976, p. 12.Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=028711_02&Pesq=%22Nova%20Cathedral%22&id=2919802827722&pagfis=21184. Acesso em: 18 de julho de 2026. CATEDRAL AGORA NA FASE DAS PILASTRAS. Diário de Natal, Natal/RN,

12 out. 1974, p. 1. Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=028711_02&Pesq=%22Nova%20Cathedral%22&id=2919802827722&pagfis=14513. Acesso em: 18 de julho de 2026. CATEDRAL BALCÃO É ANTIESTÉTICA. O Diário de Natal, Natal/RN, 26 ago. 1967, p. 8.Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=028711_01&pesq=%22Cathedral%22&pasta=ano%20196&hf=memoria.bn.gov.br&pagfis=21852 CATEDRAL FUNCIONAL. A Ordem, Natal/RN, 11 jun. 1966, p. 3.Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/764051/26209. Acesso em: 18 de julho de 2026. CATEDRAL TERÁ NOVA CAMPANHA. Diário de Natal, Natal/RN, 21 maio 1974, p. 3.Disponivel em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/028711_02/13111. Acesso em: 18 de julho de 2026. CATEDRAL TERÁ PRIMEIRA ETAPA CONCLUÍDA EM 1978. O Poti, Natal/RN, 02 jul. 1978, p. 12.Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/031151_03/8562. Acesso em: 18 de julho de 2026. CHALOUB, Sidney. Apresentação. História Social: Revista dos Pós-graduandos em História da UNICAMP. Campinas, nº22 e 23, 2012. CHARTIER, Roger. A história cultural: entre práticas e representações. Lisboa: DIFEL, 1990. CINCO MIL PESSOAS COMPORTARÁ A CATEDRAL. O Poti, Natal/RN, 22 jun. 1955, p. 8.Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/028711_02/4221. Acesso em: 18 de julho de 2026. COMEÇADA A CATEDRAL METROPOLITANA. Diário de Natal, Natal/RN, 28 nov. 1973.Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/028711_02/11817. Acesso em: 18 de julho de 2026. CONFIRMADO: ANTEPROJETO DA CATEDRAL NÃO SERÁ APROVADO. O Poti, Natal/RN, 26 set. 1971, p. 1.Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/028711_02/4221. Acesso em: 18 de julho de 2026. D. NIVALDO APRESENTA PROJETO DA CATEDRAL. O Diário de Natal, Natal/RN, 01 dez. 1971, p. 5.Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=028711_02&pesq=%22Nova%20Cathedral%22&pasta=ano%20197&hf=memoria.bn.gov.br&pagfis=8097. Acesso em: 18 de julho de 2026. DESENHO DA CATEDRAL JÁ ESTÁ PRONTO E PODE SER APROVADO PELA COMISSÃO. O Diário de Natal, Natal/RN, 16 jan. 1968, p. 3. Acesso em: 18 de julho de 2026. DESENHO DA NOVA CATEDRAL SERÁ CONCLUÍDO ATÉ SEXTA-FEIRA. O Diário de Natal, Natal/RN, 10 jan. 1968, p. 5. Acesso em: 18 de julho de 2026. FONTENELLE, Geraldo. A nova catedral. Diário de Natal, Natal/RN, 10 jan. 1958, p. 2. Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=028711_01&pesq=%22Cathedral%22&pasta=ano%20196&hf=memoria.bn.gov.br&pagfis=188 FRANÇA, Aderbal. A nossa catedral. A República, Natal/RN, 15 jan. 1936, p. 8. Acesso em: 18 de julho de 2026. FRANÇA, Aderbal. Quando teremos a nossa catedral. O Diário de Natal, Natal/RN, 15 abr. 1952, p. 4. Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=028711_01&pesq=%22Cathedral%22&pasta=ano%20196&hf=memoria.bn.gov.br&pagfis=36684. Acesso em: 18 de julho de 2026. FRANÇA, Aderbal. O sonho do padre João Maria. O Diário de Natal, Natal/RN, 03 maio 1952, p. 3. Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=028711_01&pesq=%22Cathedral%22&pasta=ano%20196&hf=memoria.bn.gov.br&pagfis=36781. Acesso em: 18 de janeiro de 2026 FRANÇA, Aderbal. Festa da mocidade. O Diário de Natal, Natal/RN, 27 mar. 1963, p. 4.Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=028711_01&pesq=%22Catedral%22&pasta=ano%20195&hf=memoria.bn.gov.br&pagfis=13189. Acesso em: 18 de julho de 2026. FRANÇA, Aderbal. A catedral. O Diário de Natal, Natal/RN, 06 set.

1967, p. 7.Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/docreader/DocReader.aspx?bib=028711_01&pagfis=21897. Acesso em: 18 de julho de 2026. FRANÇA, Aderbal. [Sem título]. O Diário de Natal, Natal/RN, 05 out. 1971, p. 2. Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=028711_02&pesq=%22Nova%20Cathedral%22&pasta=ano%20197&hf=memoria.bn.gov.br&pagfis=4286. Acesso em: 18 de julho de 2026. GINZBURG, Carlo. Sinais: raízes de um paradigma indiciário. In: _____. Mitos, emblemas e sinais. São Paulo: Companhia das Letras, 1991. GOODWIN JR., James William. Cidades de papel: imprensa, progresso e tradição – Diamantina e Juiz de Fora, MG (1884-1914). Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. GORELIK, Adrián. Imaginarios urbanos y imaginación urbana. In: _____. Miradas sobre Buenos Aires. Buenos Aires, 2004. GOVERNO VAI AJUDAR NA CONSTRUÇÃO DA CATEDRAL. Diário de Natal, Natal/RN, 08 ago. 1975, p. 12. Acesso em: 18 de julho de 2026. GRANDE CONCENTRAÇÃO CATÓLICA, DOMINGO PRÓXIMO NA PRAÇA PIO X. O Poti, Natal/RN, 03 out. 1957, p. 1. Acesso em: 18 de julho de 2026. INÍCIO DA CONSTRUÇÃO DA CATEDRAL SERÁ HOJE. Diário de Natal, Natal/RN, 23 maio 1973, p. 4. Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/028711_02/8205. Acesso em: 18 de julho de 2026. KRILOW, L. S. W. Jornal como fonte e/ou objeto da escrita histórica: proposta metodológica aplicada à análise das representações sobre “o político” na “grande imprensa carioca” de 1955 a 1960. Oficina do Historiador, v. 12, n. 1, 4 out. 2019. LÉVI-STRAUSS, Claude. Tristes trópicos. São Paulo: Companhia das Letras, 1996. MELHOR PROJETO PARA A CATEDRAL FOI RECUSADO PELA ARQUIDIOCESE. Diário de Natal, Natal/RN, 07 ago. 1968, p. 8. Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/docreader/DocReader.aspx?bib=028711_01&pagfis=23746. Acesso em: 18 de julho de 2026. MIRANDA, João M. F. de. 380 anos de história fotográfica de Natal (1599–1979). Natal: UFRN, 1981. NATALENSE AJUDA A CATEDRAL. Diário de Natal, Natal/RN, 18 nov. 1973, p. 1. Acesso em: 18 de julho de 2026. O MELHOR PROJETO PARA A CATEDRAL FOI RECUSADO PELA ARQUIDIOCESE. Diário de Natal, Natal. 07 de agosto de 1968. P. 8. Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/docreader/DocReader.aspx?bib=028711_01&pagfis=23746. Acesso em: 18 de julho de 2026. O PROBLEMA PERMANENTE. Diário de Natal, Natal/RN, 22 set. 1972, p. 4.Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/DocReader/028711_02/7421. Acesso em: Acesso em: 18 de julho de 2026. O SANTO DO DIA. O Poti, Natal/RN. 20 abril 1956, p. 4 Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/DocReader/031151_01/4412?pesq=%22flamulas%22%20and%20%22catedral%22. Acesso em: 18 de julho de 2026.

Anexos



Figura 1. Parte da sistematização dos resultados encontrados na Hemeroteca Digital.Fonte: Autora (com as doutorandas Rebeca Sousa e Natália Madruga), 2026.



Figura 2. Parte da sistematização dos resultados encontrados na Hemeroteca Digital em diferentes jornais brasileiros.Fonte: Elaborado pela Autora. Base de dados do HCUrb (pesquisa Ruínas da Modernidade), 2024.



Figura 3 . Manchete: “Catedral começa a cair no dia 22” . Fonte: O Diário de Natal, Natal/RN, 7 de junho de 1973. Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=028711_02&Pesq=%22Nova%20Cathedral%22&id=2919802827722&pagfis=10051



Figura 4. Manchete: “Catedral agora na fase das pilastras” .Fonte: O Diário de Natal, Natal/ RN. 12 outubro de 1974, p. 1. Disponível em: https://memoria.bn.gov.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=028711_02&Pesq=%22Nova%20Cathedral%22&id=2919802827722&pagfis=



Figura 5. Projeto do arquiteto Georges Munier para a Catedral. Fonte: Miranda (1981, p. 154)



Figura 6. Perspectiva do projeto Neorromânico.Fonte: O Poti, Natal/RN. 1 de outubro de 1955, p. 8. Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/031151_01/3036



Figura 7. Vegetação crescendo na construção da Catedral Neorromânica na Praça Pio X em 1971.Fonte: Diário de Natal, Natal/RN. 27 de agosto de 1971, p. 3. Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/DocReader/028711_02/4007



Figura 8. Ruínas da Catedral Metropolitana do Natal, na Praça Pio X.Fonte: Diário de Natal, Natal/RN. 28 de outubro de 1973, p. 5. Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/DocReader/028711_02/11817



Figura 9. Perspectiva do projeto. Fonte: Diário de Natal, Natal/RN. 11 de maio de 1967, p. 8. Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/DocReader/028711_01/22609



Figura 10. Perspectiva do projeto de João Mauricio Miranda.Fonte: Diário de Natal, Natal/RN. 25 de agosto de 1967, p. 8. Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/028711_01/23739



Figura 11. Perspectiva do projeto de Luciano Toscano.Fonte: Diário de Natal, Natal/RN. 26 de agosto de 1967, p. 8. Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/DocReader/028711_02/4149



Figura 12. Maquete do projeto de Grevi.Fonte: Diário de Natal, Natal/RN. 4 de junho de 1972, p. 4.Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/docreader/028711_02/8205



Figura 13. Manchete “O problema permanente” .Fonte: O PROBLEMA PERMANENTE. A CATEDRAL (1972). Disponível em: http://memoria.bn.gov.br/DocReader/028711_02/7421. Acesso em: 20 de janeiro de 2026.

CÓDIGO: HS1510

AUTOR: MARCONE PEDRO DA SILVA MOURA

ORIENTADOR: RENATO DE MEDEIROS

TÍTULO: ENTRE ARQUITETURA, CIDADE E MERCADO: produção e representação da habitação vertical multifamiliar em Natal/RN

Resumo

A verticalização da habitação constitui como um dos processos mais significativos da urbanização brasileira contemporânea, promovendo transformações na paisagem urbana, nos modos de habitar e nas formas de produção do espaço. Em Natal/RN, a consolidação desse fenômeno acompanha a ampliação da atuação do mercado imobiliário e a difusão de novos modelos de moradia multifamiliar. Nesse contexto, o estudo, fruto de uma pesquisa de iniciação científica, investiga como estratégias arquitetônicas, urbano-ambientais e discursivas são mobilizadas pelo mercado imobiliário na produção e na representação da habitação vertical contemporânea destinada à classe média. O objetivo é analisar essas estratégias e compreender sua articulação na construção de valores associados ao morar contemporâneo, considerando as relações entre arquitetura, cidade e mercado. Para tanto, a pesquisa adota uma abordagem qualitativa e comparativa, fundamentada na análise gráfica de representações arquitetônicas, tendo como universo de estudo quatro edifícios verticais multifamiliares localizados, em sua maioria, na porção sul da capital potiguar, extendendo-se, em parte, ao município vizinho de Parnamirim/RN. A investigação estrutura-se em quatro categorias de análise, sendo a inserção urbana e articulações com o entorno imediato; as estratégias projetuais e mitigação de impactos urbano-ambientais; as configurações espaciais e dinâmicas do habitar contemporâneo e a construção discursiva e linguagem mercadológica.

Palavras-chave: Edifício vertical; habitação multifamiliar; mercado imobiliário; Natal

TITLE: BETWEEN ARCHITECTURE, CITY, AND MARKET: production and representation of multifamily vertical housing in Natal/RN, Brazil

Abstract

Housing verticalization is one of the most significant processes of contemporary Brazilian urbanization, transforming urban landscapes, ways of inhabiting, and

forms of spatial production. In Natal, Rio Grande do Norte, this phenomenon has accompanied the expansion of the real estate market and the dissemination of new multifamily housing models. In this context, the study investigates how architectural, urban-environmental, and discursive strategies are mobilized by the real estate market in the production and representation of contemporary vertical housing aimed at the middle class. The objective is to analyze these strategies and understand their articulation in constructing values associated with contemporary living, considering the relationships between architecture, the city, and the market. The research adopts a qualitative and comparative approach based on the graphic analysis of architectural representations of four multifamily residential buildings, located predominantly in the southern area of Natal, with some extending into the neighboring municipality of Parnamirim. The investigation is structured around four analytical categories: urban integration and connections with the immediate surroundings; design strategies and mitigation of urban-environmental impacts; spatial configurations and dynamics of contemporary living; and discursive construction and marketing language. These dimensions show how architecture responds to market demands and shapes city life today.

Keywords: Vertical housing; multifamily housing; real estate market; Natal.

Introdução

A verticalização da habitação constitui um dos processos mais significativos da urbanização brasileira contemporânea, promovendo transformações na paisagem urbana, nos modos de habitar e nas formas de produção do espaço. Em Natal/RN, a consolidação desse fenômeno, intensificada nas últimas décadas, acompanha a ampliação da atuação do mercado imobiliário e a difusão de novos modelos de moradia multifamiliar voltados a distintos segmentos sociais. Nesse contexto, os edifícios residenciais verticais ultrapassam sua condição de objeto arquitetônico, configurando-se como produtos simultaneamente urbanos, culturais e mercadológicos, cujos atributos são construídos não apenas por meio das soluções projetuais adotadas, mas também por estratégias de representação e de comunicação voltadas à valorização simbólica dos empreendimentos. Partindo dessa perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo analisar a produção e a representação da habitação vertical contemporânea em Natal, buscando compreender de que maneira estratégias arquitetônicas, urbano-ambientais e discursivas são mobilizadas pelo mercado imobiliário na construção de valores associados ao morar contemporâneo. O artigo busca contribuir para os debates contemporâneos sobre as relações entre arquitetura, cidade e mercado, evidenciando como processos de produção, representação e consumo participam da configuração da habitação vertical contemporânea. Para tanto, apresenta inicialmente o processo histórico de verticalização em Natal, seguido da metodologia e do universo de estudo, das análises desenvolvidas e das considerações finais.

A verticalização urbana constitui um fenômeno que, no Brasil, intensificou-se ao longo do século XX, apresentando temporalidades distintas entre as cidades. No

Nordeste, enquanto Recife e Fortaleza iniciaram esse processo ainda na década de 1930, em João Pessoa e Natal as primeiras edificações em altura surgiram apenas a partir dos anos 1950 (Mota, 2018; Barroso, 2015; Fernandes, 2013; Câmara, 2025). Apesar de suas particularidades históricas e urbanas, a verticalização nessas cidades foi impulsionada por ciclos econômicos e pela atuação do mercado imobiliário, frequentemente mediada por legislações urbanísticas que contribuíram para a valorização do solo urbano e para a consolidação de processos de segregação socioespacial. Em Natal/RN, a verticalização expandiu-se das áreas centrais em direção à região sul, acompanhando os eixos viários de crescimento da cidade. Sua consolidação nas últimas décadas revela transformações que extrapolam a dimensão física do espaço urbano, alcançando também as formas de produção, representação e consumo da habitação multifamiliar. Nesse contexto, como já apontado em pesquisas sobre outras cidades (Vargas e Araújo, 2013), o mercado imobiliário passou a mobilizar estratégias arquitetônicas e discursivas voltadas à valorização simbólica dos empreendimentos. Diante desse cenário, a presente pesquisa busca compreender como tais estratégias participam da construção de valores associados à habitação vertical contemporânea.

Metodologia

A presente pesquisa direciona sua atenção aos empreendimentos voltados à classe média, buscando identificar estratégias de produção e de representação do morar contemporâneo mobilizadas pelo mercado imobiliário. Para tanto, adota-se uma abordagem qualitativa e comparativa, fundamentada na análise gráfica de representações arquitetônicas — procedimento metodológico empregado por autores como Florio *et al.* (2006) e Tagliari (2008). O universo investigado é composto por quatro edifícios verticais multifamiliares, sendo estes: (1) Mood Candelária e (2) Mood Capim Macio, desenvolvidos pela Moura Dubeux, além de (3) Reserva do Vale e (4) Vista Ponta Negra, produzidos pela Mirantes Empreendimentos, sendo localizados, em sua maioria, nos principais bairros da Região Administrativa Sul de Natal, estendendo-se ao município vizinho de Parnamirim/RN. Estruturada a partir de quatro categorias de análise, a investigação desenvolve-se em distintas escalas referentes à produção da habitação multifamiliar contemporânea. Inicialmente, examinam-se (I) as relações estabelecidas entre os empreendimentos, contemplando sua inserção na malha urbana e (II) as estratégias projetuais voltadas à mitigação dos impactos na cidade e em seu meio. Em seguida, a análise concentra-se no objeto arquitetônico, abordando (III) as configurações espaciais das tipologias habitacionais e suas relações com as transformações contemporâneas dos modos de habitar. Por fim, investiga-se (IV) a linguagem comunicacional e mercadológica mobilizada na construção discursiva dos empreendimentos. A seleção dos casos fundamenta-se na disponibilidade pública de conteúdos imagéticos e textuais mediante materiais publicitários veiculados aos escritórios de arquitetura e de construtoras locais.

Resultados e Discussões

INSERÇÃO URBANA E ARTICULAÇÕES COM ENTORNO IMEDIATO

Ao examinar os empreendimentos verticais selecionados a partir de seus materiais publicitários, observa-se que a inserção urbana assume papel central na construção de narrativas, que convergem no sentido de transformar a localização, bem como sua articulação com entorno imediato, em atributos de valorização imobiliária. Recorrente na produção contemporânea da habitação vertical, tal estratégia extrapola a mera indicação geográfica do empreendimento e passa a operar como mecanismo de qualificação simbólica do espaço urbano. Desse modo, a localização deixa de atuar exclusivamente como suporte físico da edificação para assumir condição estratégica na construção de imaginários associados como à conveniência, à centralidade e à distinção socioespacial. Nessa perspectiva, Alves (2009) afirma que o lugar adquire o estatuto de "marca", sendo incorporado à lógica promocional como elemento capaz de potencializar a atratividade mercadológica do produto imobiliário. Tais estratégias de valorização e de ressignificação da localização podem ser observadas comparativamente na Figura 1 (Anexo), que reúne as principais representações de seus contextos urbanos estabelecidos entre os empreendimentos e o seu entorno.

Considerando-se que o produto arquitetônico, na maioria dos casos, é comercializado anteriormente à sua materialização, existindo, pois, como projeção, imagem ou promessa, torna-se evidente o protagonismo das representações gráficas na constituição de seu valor. Assim, as peças publicitárias não se restringindo à sua função informativa, transcendem como dispositivos de mediação entre arquitetura, cidade e consumo. Ao articularem o edifício a referenciais urbanos previamente selecionados, como centralidades comerciais, equipamentos de serviços, áreas ambientalmente valorizadas e importantes eixos de mobilidade, tais representações produzem leituras seletivas da porção sul e metropolitana da cidade de Natal (Figura 1), direcionando a percepção do consumidor para determinados atributos desejáveis. Ainda que os empreendimentos analisados possuam soluções gráficas distintas, verifica-se frequentemente, em macro e micro escala, o emprego de mapeamentos esquemáticos, de imagens hiper-realistas e de composições visuais voltadas à construção de uma inserção do edifício na malha urbana já consolidada, de maneira qualificada e valorizada historicamente.

Nessa lógica, determinados fragmentos da cidade são reiteradamente associados a ideias de acessibilidade, praticidade, segurança e qualidade de vida, contribuindo para consolidação de processos seletivos de valorização territorial. Tal dinâmica aproxima-se das discussões argumentadas por Harvey (2005) acerca da produção capitalista do espaço, sobretudo ao evidenciar o papel desempenhado pelo ambiente construído nos processos de acumulação e de gentrificação. Desse modo, evidencia-se a consolidação de um modelo de representação que, ao simultaneamente atribui valor ao tecido urbano, contribui para a sua própria produção enquanto mercadoria, reforçando a primazia do

valor de troca sobre o valor de uso e reiterando, ainda que de forma indireta, dinâmicas de diferenciação e segmentação socioespacial. Nesse sentido, ao transformar o entorno em argumento e o lugar em signo, tais estratégias comunicam ao projeto arquitetônico uma geografia urbana pautada pela lógica da valorização imobiliária, na qual, conforme discutido por Santos (2020), a localização, marcada por sua singularidade e por processos de escassez, constitui como elemento central na definição do valor dos empreendimentos e na concentração seletiva dos investimentos no espaço urbano.

ESTRATÉGIAS PROJETUAIS E MITIGAÇÃO DE IMPACTOS URBANO-AMBIENTAIS

Se por um lado, a inserção urbana e a valorização territorial constituem elementos fundamentais na construção discursiva dos empreendimentos analisados, por outro lado, observa-se a crescente incorporação de estratégias projetuais voltadas à mitigação dos impactos decorrentes do processo de verticalização, evidenciando uma ampliação dos mecanismos de qualificação simbólica mobilizados pelo *marketing* imobiliário. Sob essa perspectiva, soluções tradicionalmente associadas às exigências técnicas, ambientais e urbanísticas incorporam-se de maneira expressiva nos materiais publicitários, integrando a construção imagética dos projetos com características capazes de reforçar percepções de sustentabilidade, responsabilidade ambiental e qualificação urbana, aspecto sintetizado comparativamente nas ilustrações da Figura 2 em anexo.

Entre as medidas urbano-ambientais identificadas, destacam-se ações compensatórias relacionadas à recomposição ambiental, como a recuperação de áreas degradadas mediante o replantio de vegetação nativa, frequentemente apresentadas como iniciativas destinadas à redução dos impactos produzidos pela implantação dos empreendimentos sobre os ecossistemas preexistentes. Associam-se a essas soluções, propostas paisagísticas elaboradas com espécies selecionadas em consonância com as características da flora local, buscando amenizar os efeitos da ocupação construtiva sobre o microclima urbano e conferir maior qualificação ambiental às áreas de transição entre o conjunto edificado e a cidade. Também se destacam soluções como a implantação de edifícios-garagem concebidos como barreiras acústicas frente aos ruídos provenientes do tráfego intenso das vias adjacentes, além da instalação de sistemas fotovoltaicos nas coberturas, apresentados como alternativas voltadas à eficiência energética e à redução do consumo de eletricidade das áreas comuns. Soma-se a essas estratégias a adoção de superfícies permeáveis e áreas verdes destinadas à absorção das águas pluviais, a fim de mitigar alagamentos em setores marcados pela crescente impermeabilização do solo.

Ao discutirem a resiliência ambiental das edificações, Hong *et al.* (2023) argumentam que soluções relacionadas à geração descentralizada de energia, ao desempenho ambiental e à capacidade de resposta frente a eventos extremos tendem a assumir papel cada vez mais relevante no planejamento arquitetônico

contemporâneo. Tal entendimento permite compreender por que atributos tradicionalmente vinculados ao desempenho técnico dos edifícios passam a ocupar posição de destaque nas estratégias de divulgação imobiliária. Verifica-se, portanto, que as medidas mitigadoras urbano-ambientais extrapolam sua dimensão estritamente funcional, assumindo papel relevante na construção discursiva dos empreendimentos analisados. A incorporação de soluções associadas à eficiência energética, ao manejo sustentável das águas pluviais e à qualificação ambiental das áreas livres evidencia uma aproximação crescente entre os discursos da sustentabilidade e os mecanismos de valorização imobiliária.

CONFIGURAÇÕES ESPACIAIS E DINÂMICAS DO HABITAR CONTEMPORÂNEO

Enquanto as categorias anteriores permitiram compreender, em macro-escala, as relações entre os empreendimentos, a cidade e os impactos decorrentes do processo de verticalização, a análise das configurações espaciais desloca o olhar para o interior das habitações destes edifícios residenciais, âmbito em que se materializam diretamente as estratégias projetuais direcionadas à adequação da moradia às transformações contemporâneas dos modos de “morar nas alturas”. Sob esse viés, os materiais publicitários atribuem centralidade à organização interna dos apartamentos, apresentando-o como respostas às novas demandas associadas ao morar e às expectativas de consumo do público-alvo ao qual se destina, cujas principais soluções espaciais encontram-se reunidas comparativamente na Figura 3.

Nesse contexto, a configuração espacial dos edifícios à classe média revela um conjunto de soluções projetuais orientadas pela racionalização das áreas privativas e pela otimização dos usos domésticos, evidenciando adaptações promovidas pelo mercado imobiliário diante das transformações atuais nos arranjos familiares, nas relações de trabalho e nas práticas cotidianas da vida urbana. A análise das tipologias habitacionais dos exemplares selecionados para o estudo da pesquisa (Figura 3) permitiu identificar a predominância de plantas compostas por dois ou três dormitórios, organizadas a partir da tradicional divisão entre os setores social, íntimo e de serviço, característica ainda amplamente presente na produção habitacional brasileira, como discutem Tramontano (2006) e Gurgel (2013). Embora essa lógica de setorização permaneça estruturando a organização interna dos ambientes, observa-se a incorporação de estratégias voltadas à flexibilização parcial dos usos, especialmente mediante a integração entre sala de estar, jantar e cozinha, bem como pela valorização das varandas como extensão das áreas sociais e pela incorporação dos quartos reversíveis para futura ampliação.

Todavia, a leitura comparativa ilustrada na Figura 3 em anexo evidencia que tais estratégias diferenciam-se daquelas constatadas em estudos analíticos realizados por (OMITIDO), de empreendimentos direcionados aos segmentos de maior poder aquisitivo da cidade potiguar. Apesar dos exemplares de alto padrão tenderem a incorporar ambientes mais amplos e maior diversidade programática,

os projetos voltados à classe média revelam um processo mais intenso de compactação espacial, no qual diferentes atividades passam a compartilhar ambientes anteriormente segregados. De acordo com estudos de Costa Filho (2005), Villa (2014) e Mello e Villa (2013), a redução progressiva das áreas úteis tem sido acompanhada pela manutenção de programas habitacionais semelhantes aos encontrados em unidades de maior metragem, resultando na sobreposição funcional de ambientes e na supressão de determinados espaços considerados secundários pelo mercado imobiliário. Tal dinâmica revela uma contradição significativa. Ao mesmo tempo em que os materiais publicitários enfatizam flexibilidade, funcionalidade e adaptação aos novos estilos de vida da sociedade contemporânea, constata-se a permanência de modelos espaciais fortemente padronizados, cuja lógica produtivista permanece orientada pela maximização do aproveitamento construtivo e pela viabilidade econômica dos empreendimentos. Como destacam diversos estudos sobre a habitação multifamiliar por Villa (2020), as mudanças observadas nas estruturas familiares, a redução do número de moradores por domicílio, a ampliação do trabalho remoto pós-pandemia da COVID-19 e a crescente diversidade dos grupos domésticos demandam configurações mais adaptáveis e menos rigorosamente vinculadas aos usos predeterminados. Dessa forma, as configurações espaciais observadas nos projetos das edificações analisadas evidenciam um cenário caracterizado pela coexistência entre permanências e transformações, as quais expectativas de consumo, restrições econômicas e mudanças socioculturais se entrelaçam na produção da habitação multifamiliar.

CONSTRUÇÃO DISCURSIVA E LINGUAGEM MERCADOLÓGICA

A convergência dos atributos urbanos, ambientais e arquitetônicos identificados nas análises precedentes encontra, na linguagem publicitária, um importante mecanismo de síntese e difusão de signos. Se tais características constituem a base material dos empreendimentos, é por meio do *marketing* produzido em torno deles que assumem significados específicos e a ocupar posições diferenciadas no mercado imobiliário. Assim, *slogans*, chamadas promocionais e textos institucionais operam como mecanismos de seleção e hierarquização de atributos, definindo quais aspectos devem assumir centralidade na percepção do potencial comprador. Mais do que descrever edificações, os discursos publicitários observados procuram estabelecer associações entre o produto imobiliário e valores previamente legitimados no imaginário social mediante a difusão emocional ao *storytelling.*

Segundo estudos desenvolvidos por autores como Greimas e Courtes (1990) e Barros (2003), os processos comunicacionais fundamentam-se na construção de simulacros e contratos de sentido, por meio dos quais determinados objetos passam a representar valores desejáveis para seus destinatários. Nos empreendimentos analisados, essa dinâmica manifesta-se na recorrente vinculação da habitação a ideias de bem-estar, segurança, convivência familiar, realização pessoal e proximidade com a natureza. O apartamento, portanto, deixa de ser apresentado apenas como unidade habitacional para assumir a condição de suporte material de valores culturalmente compartilhados Tal

estratégia aproxima-se do que Vargas (2013) compreende como processo de mitificação dos objetos de consumo, no qual significados historicamente construídos passam a ser percebidos como atributos naturais das mercadorias. Sob essa lógica, a publicidade opera por meio da associação de ideias, transferindo para o empreendimento valores que lhe são externos e convertendo-os em elementos constitutivos de sua identidade mercadológica. Dessa forma, não se comercializam exclusivamente espaços construídos, mas conjuntos simbólicos capazes de produzir identificação e reconhecimento junto aos diferentes segmentos consumidores.

Os resultados obtidos permitem identificar significativa convergência entre os recursos discursivos empregados nos empreendimentos voltados à classe média e aqueles anteriormente observados na produção imobiliária destinada aos segmentos de maior renda da cidade natalense estudados por (OMITIDO). Em ambos os casos, verifica-se a presença de uma mesma racionalidade comunicacional, fundamentada na construção de narrativas persuasivas e na atribuição de significados que extrapolam a materialidade do edifício. As distinções concentram-se, sobretudo, nos valores mobilizados para sustentar tais narrativas. Enquanto os empreendimentos de alto padrão enfatizam exclusividade, sofisticação e distinção socioespacial, os exemplares aqui analisados privilegiam discursos relacionados à qualidade de vida, à conquista da moradia, ao convívio cotidiano e ao equilíbrio entre conforto, lazer e natureza. Permanece, contudo, a utilização de mecanismos semelhantes de persuasão e valorização simbólica, evidenciando a adaptação de uma mesma lógica mercadológica a diferentes perfis de consumo.

Conclusão

Diante das articulações estabelecidas entre cidade, arquitetura e representação, a presente investigação permitiu compreender que a produção contemporânea da habitação vertical multifamiliar destinada à classe média na capital potiguar não pode ser interpretada a partir de uma única dimensão de análise. Ao contrário, os resultados obtidos indicam a necessidade de abordagens capazes de transitar entre diferentes escalas de observação, nas quais processos urbanos mais amplos, soluções arquitetônicas e mecanismos de construção simbólica do produto imobiliário se condicionam mutuamente. Nesse sentido, a pesquisa reafirma a pertinência de leituras transescalares para a compreensão das formas contemporâneas de produção do ambiente construído, especialmente em um contexto marcado pela intensificação de transformações sociais, ambientais e econômicas que incidem diretamente sobre as práticas de produzir, de morar e de representar a cidade. Tal constatação revela, ainda, que os desafios contemporâneos não se manifestam isoladamente, mas por meio de processos interdependentes, nos quais as respostas produzidas em determinada escala repercutem sobre outras, evidenciando a crescente complexidade das relações entre arquitetura e urbanismo.

Ao retomar o objetivo inicialmente proposto, o estudo permitiu identificar permanências, adaptações e reformulações nas estratégias projetuais e

representacionais mobilizadas pelo mercado imobiliário destinado à classe média, evidenciando que a produção habitacional recente se constitui por meio de um contínuo processo de negociação entre demandas contemporâneas, condicionantes econômicos e expectativas de consumo. As constatações alcançadas demonstram que a habitação vertical ultrapassa sua condição de objeto arquitetônico autônomo, assumindo a condição de artefato simultaneamente urbano, cultural e mercadológico, cuja produção envolve a articulação de atributos espaciais, discursos e valores socialmente compartilhados. Além do que um mero produto imobiliário, o edifício vertical contemporâneo configura-se como expressão material das transformações que atravessam o espaço urbano e das novas exigências impostas ao ambiente construído diante de cenários de crescente instabilidade e incerteza. Por fim, os resultados obtidos indicam a pertinência de futuras investigações voltadas à compreensão das formas pelas quais as estratégias projetuais de mitigação de impactos urbano-ambientais vêm sendo incorporadas, representadas e comunicadas nos materiais publicitários das obras contemporâneas. Em um cenário marcado pela intensificação das mudanças climáticas e pela emergência de novos desafios socioambientais, torna-se particularmente relevante investigar em que medida atributos relacionados à adaptação climática, à resiliência e à sustentabilidade constituem respostas efetivas às urgências do tempo presente ou, alternativamente, passam a integrar novas estratégias de valorização simbólica e diferenciação mercadológica da habitação

Referências

ALVES, Maria Cristina Dias. Publicidade imobiliária e suas construções retóricas. In: Congresso Brasileiro de ciências da comunicação, 32., Curitiba. **Anais [...].** Curitiba, 2020. Disponível em: http://www.intercom.org.br/papers/nacionais/2009/resumos/r4-1304-1.pdf. Acesso em 06 jun. 2026.

BARROS, D.L.P. **Introdução à linguística.** São Paulo: Contexto, 2002- 2003. 2 v. p. 25-53.

BARROSO, Paulo Hermano Mota. **Verticalização residencial em Fortaleza:** 1979 – 2009. 2015. 140 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2015.

CÂMARA, Maria Júlia de Brito. **Estado, capital e cidade:** a produção imobiliária de Natal frente à permissividade do Plano Diretor de 2022. 2025. 174 f. Trabalho Final de Graduação (Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro de Tecnologia, Departamento de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.

COSTA FILHO, Lourival Lopes. **Discussão sobre a definição dimensional em apartamentos:** contribuição à ergonomia do ambiente construído. 2005. 150p. Dissertação (Mestrado em Design) - Programa de Pós-Graduação em Design. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

FERNANDES, Maria Andreína Moreira. **A (re)produção do espaço urbano no Bairro Altiplano, João Pessoa-PB:** estratégias, iniciativas e interesses dos agentes que produzem a cidade. 2013. 285 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013

FLORIO, Wilson; GALLO, Haroldo; SANT'ANNA, Silvio; MAGALHÃES, Fernanda. **Projeto Residencial Moderno e Contemporâneo:** análise gráfica dos princípios de forma, ordem e espaço de exemplares da produção arquitetônica residencial. Vol. 1 e 2. São Paulo: Editora MackPesquisa, 2002.

GREIMAS, A. J.; COURTES, J. **Sémiotique:** dictionnaire raisonné de la théorie du langage II. Paris: Hachette, 1990.

GURGEL, Miriam. **Projetando espaços:** guia de arquitetura de interiores para áreas residenciais. São Paulo: Senac São Paulo, 2013, 301p.

HARVEY, David. **A produção capitalista do espaço.** São Paulo: Annablume, 2005.

HONG, Tianzhen *et al*. **Enhancing Resilience in Buildings through Energy Efficiency.** Pacific Northwest National Laboratory, 2023, p. 177. Disponível em: https://www.energycodes.gov/energy-resilience. Acesso em 06 jun. 2026.

OMITIDO

MELO, Lara.; VILLA, Simone. **Adequação Espacial em Apartamentos:** Avaliação Pós-Ocupação de Habitações de Classe-média na Cidade de Uberlândia. In.: Pesquisa desenvolvida no Grupo (MORA) Pesquisa em Habitação, do núcleo de Pesquisa em Projeto de Arquitetura da faculdade de Arquitetura e Urbanismo e Design (FAUeD) da Universidade Federal de Uberlândia, financiada pela FAPEMIG, CNPq e PROGRAD/UFU. 2013, p. 1-23.

MOTTA, Enio Laprovitera. DA ESTÉTICA DA REENTRÂNCIA À ESTÉTICA DA ELASTICIDADE: A ARQUITETURA VERTICAL RESIDENCIAL EM RECIFE, 1960-2010. **Revista Projetar - Projeto e Percepção do Ambiente,** [S. l.], v. 3, n. 3, p. 08–19, 2018. DOI: 10.21680/2448-296X.2018v3n3ID16532. Disponível em: https://periodicos.ufrn.br/revprojetar/article/view/16532. Acesso em: 1 jun. 2026.

SANTOS, G.M.D. **Ciclos imobiliários da verticalização paulistana:** Indícios, condicionantes e caracterização. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2020.

TAGLIARI, Ana; FLORIO, Wilson **Os princípios orgânicos na obra de Frank Lloyd Wright:** uma abordagem gráfica de exemplares residenciais. 2008. Dissertação (Mestrado em Arquitetura – Artes) – Instituto de Artes, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

TRAMONTANO, Marcelo. **Apartamentos, arquitetura e mercado:** estado das coisas. In: Oficina Verticalização das cidades brasileiras, 2006, São Paulo. Disponível em: http://www.nomads.usp.br/site/livraria/livraria.html. Acesso em: 06 jun. 2026.

VARGAS, Heliana Comin; ARAÚJO, Cristina. Arquitetura e mercado imobiliário. São Paulo: Editora Manole, 2013.

VILLA, Simone; SARAMAGO, Rita. A qualidade Espacial e Ambiental de edifícios de apartamentos em cidades médias. In: III Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo - Arquitetura, Cidade e Projeto: uma construção coletiva, **Anais [...].** São Paulo, 2014.

VILLA, Simone. **Morar em apartamento.** São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

Anexos



Figura 1 - Comparativo das representações quanto à inserção urbana do edifício



Figura 2 - Comparativo das representações quanto às estratégias de mitigação de impactos urbanos-ambientais



Figura 3 - Comparativo das representações quanto às configurações espaciais das tipologias habitacionais

CÓDIGO: HS1529

AUTOR: LAÍS TEIXEIRA DE AMORIM

ORIENTADOR: CLARA OVÍDIO DE MEDEIROS RODRIGUES

TÍTULO: Mapeamento de processos projetuais com metas de resiliência em contextos de climas futuros

Resumo

As mudanças climáticas, as transformações sociais e as demandas habitacionais contemporâneas evidenciam a necessidade de desenvolver projetos arquitetônicos capazes de responder às incertezas futuras. Nesse contexto, conceitos como resiliência e flexibilidade tornam-se estratégias relevantes para o desenvolvimento de Habitações de Interesse Social (HIS), possibilitando adaptações ao longo do tempo e maior adequação às diferentes necessidades dos usuários. Este artigo tem como objetivo analisar o processo de projeto desenvolvido por estudantes de Arquitetura e Urbanismo durante um exercício de concepção de um conjunto habitacional de interesse social, buscando identificar como as metas de resiliência e, principalmente, de flexibilidade foram incorporadas ao raciocínio projetual. A pesquisa baseia-se na análise qualitativa dos registros do processo de projeto desenvolvidos em sala de aula, considerando as discussões realizadas pelos grupos, os desenhos produzidos e as estratégias projetuais adotadas. Os resultados sintetizam as etapas do processo de projeto, os principais temas discutidos, as soluções propostas e as dificuldades encontradas pelos estudantes. A pesquisa contribuiu para compreender como conteúdos relacionados à flexibilidade para atendimento da meta de resiliência podem ser incorporados ao ensino de projeto arquitetônico e quais desafios ainda permanecem para sua aplicação em Habitação de Interesse Social.

Palavras-chave: Flexibilidade. Habitação de Interesse Social. Processo de projeto.

TITLE: Mapping of design processes with resilience goals in future climate contexts

Abstract

Climate change, social transformations, and contemporary housing demands highlight the need to develop architectural projects capable of responding to future uncertainties. In this context, concepts such as resilience and flexibility have become relevant strategies for the development of Social Housing, enabling adaptations over time and greater responsiveness to users' different needs. This article aims to analyze the design process developed by Architecture and Urbanism students during an exercise focused on the conception of a social housing complex, seeking to identify how resilience goals and, particularly, flexibility were incorporated into the design reasoning. The research is based on a qualitative analysis of records of the design process developed in the classroom, considering the discussions held by the groups, the drawings produced, and the design strategies adopted. The results will be organized into tables summarizing the stages of the design process, the main topics discussed, the proposed solutions, and the difficulties encountered by the students. The research is expected to contribute to understanding how content related to flexibility as a means of achieving resilience goals can be incorporated into architectural design education and what challenges remain for its application in Social Housing.

Keywords: Flexibility. Social Housing. Design Process. Resilience. Architectural

Introdução

A emergência climática e as constantes transformações sociais impõem novos desafios ao ambiente construído. Além da necessidade de reduzir impactos ambientais, as edificações precisam responder às mudanças nas formas de morar, às alterações na composição familiar e aos eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas. Nesse cenário, a arquitetura passa a incorporar conceitos que buscam aumentar a capacidade adaptativa das edificações, dentre eles a resiliência e a flexibilidade.

A resiliência pode ser compreendida como a capacidade de um sistema resistir, adaptar-se e recuperar-se diante de situações adversas, mantendo suas funções essenciais. No ambiente construído, esse conceito está relacionado à redução das vulnerabilidades e ao desenvolvimento de edificações capazes de responder às mudanças ambientais e sociais ao longo do tempo. Da mesma forma, a flexibilidade representa uma estratégia projetual capaz de ampliar a vida útil das edificações por meio da adaptação dos espaços às necessidades de seus usuários.

Segundo Silva et al. (2024), a flexibilidade na habitação compreende tanto alterações físicas da edificação quanto a possibilidade de diferentes formas de uso dos ambientes, incorporando conceitos como adaptabilidade, polivalência, multifuncionalidade e ampliabilidade. Esses atributos tornam-se particularmente relevantes para Habitações de Interesse Social, nas quais as mudanças familiares frequentemente ocorrem sem que haja possibilidade de substituição da moradia. Entretanto, a incorporação desses princípios ao projeto arquitetônico depende das decisões tomadas durante o processo de concepção, tornando relevante compreender como essas estratégias são construídas e desenvolvidas ao longo do raciocínio projetual.

Sob essa perspectiva, o desenvolvimento do processo projetual envolve sucessivos ciclos de reflexão, representação e tomada de decisão, nos quais problemas e soluções são construídos simultaneamente. O desenho atua como instrumento de investigação, permitindo que o projetista dialogue com o problema, teste hipóteses e reformule decisões ao longo do processo (Cross, 2011; Kowaltowski et al., 2006). Esse movimento caracteriza a reflexão-na-ação proposta

por Schön (2000), na qual novas representações produzem novos questionamentos e refinamentos projetuais. À medida que o projeto evolui, ocorre um processo contínuo de redução de incertezas, conforme discutido por Lebahar (1999). Nesse contexto, atividades desenvolvidas em sala de aula permitem observar como os estudantes constroem coletivamente soluções projetuais e incorporam novos conhecimentos durante o processo de concepção.

Este artigo tem como objetivo analisar o processo de projeto desenvolvido durante uma atividade de ensino voltada à concepção de Habitação de Interesse Social, identificando como estratégias de flexibilidade e resiliência foram incorporadas ao raciocínio projetual dos estudantes, bem como as principais potencialidades e dificuldades observadas durante o desenvolvimento do exercício.

Metodologia

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa de caráter exploratório, baseada na análise de uma experiência de ensino desenvolvida em componente curricular optativo cuja temática é o projeto de arquitetura resiliente. A experiência aqui analisada foca na aplicação do atributo de flexibilidade ao projeto arquitetônico para Habitação de Interesse Social.

Durante a aula foi realizada inicialmente uma apresentação teórica sobre conceitos de flexibilidade aplicados à arquitetura e à Habitação de Interesse Social. Os estudantes foram filmados enquanto desenvolviam a atividade. As discussões foram transcritas e os desenhos realizados foram digitalizados. Esse material compõe a base de dados que foi submetida à análise temática de conteúdo.

Ressalta-se que esta pesquisa, bem como seus procedimentos e instrumentos, foi aprovada pelo Comitê de Ética da UFRN, sob o parecer de número 7.3.67.234, em janeiro de 2025. Dessa forma, todos os estudantes assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), autorizando tanto a gravação do desenvolvimento do exercício quanto a utilização dos documentos produzidos ao longo do processo de projeto.A aula foi estruturada em duas etapas sequenciais: uma exposição teórica dialogada, a partir daapresentação de slides, e um exercício projetual prático desenvolvido em grupo.A etapa teórica partiu da fundamentação conceitual sobre flexibilidade e avançou para sua aplicação por meio de indicadores e diretrizes projetuais voltadas à habitação de interesse social.

Posteriormente, foi apresentada a classificação da flexibilidade em ativa e passiva. A flexibilidade ativa foi abordada como aquela relacionada às alterações na estrutura física do espaço habitacional, enquanto a flexibilidade passiva foi associada à polivalência, à

desierarquização e à ambiguidade funcional dos espaços residenciais, sem a necessidade de intervenções físicas ou reformas. Na sequência, foram apresentados os três indicadores de flexibilidade propostos por Silva et al. (2024): adaptabilidade, relacionada à possibilidade de diferentes usos, funções simultâneas e personalização rápida; ampliabilidade, associada ao ajuste construtivo incremental, com acréscimo ou não de área; e multifuncionalidade, relacionada à versatilidade, mobilidade e ao ajuste de componentes e mobiliários.

A exposição avançou para a apresentação de diretrizes projetuais específicas para a Habitação de Interesse Social. No âmbito dos espaços comuns, foram abordadas diretrizes relacionadas à circulação comunitária com contato externo, aos espaços compartilhados por pavimento, como lavanderias e cozinhas comunitárias, às áreas livres com múltiplas funções e ao conceito de “toque do solo”, entendido como a interação ativa de áreas privadas de comércio e serviço com o espaço público.

Em seguida, foram apresentadas diretrizes relacionadas às tipologias e aos usos, contemplando a diversificação espacial e programática por meio da variedade de tipologias, considerando a quantidade de quartos e pavimentos; da variedade de usos, com três ou mais usos integrados; da variedade de tamanhos das unidades, considerando diferenças de até 5 m² no desenho; e da manutenção do conceito de “toque do solo” como interface urbana. As diretrizes também foram abordadas na escala da unidade habitacional. Nesse âmbito, foram apresentados critérios relacionados ao planejamento de diferentes divisões internas, às possibilidades de integração espacial, à flexibilidade do layout de mobiliário e à previsão de espaços de transição entre os ambientes internos e externos, como varandas ou galerias.

Por fim, foram apresentados parâmetros relacionados à capacidade adaptativa das unidades, considerando a possibilidade de alterações nos espaços funcionais por meio de aberturas e divisórias com poucas intervenções destrutivas. As diretrizes contemplaram a possibilidade de acomodação de diferentes atividades em quartos e salas, bem como aadaptação dos espaços a diferentes perfis de ocupantes, incluindo as normas de acessibilidade.

Após a exposição teórica, foi realizada a etapa prática da atividade. Os estudantes foram divididos em grupos e receberam como condicionante o desenvolvimento de um conjunto habitacional que incorporasse estratégias de flexibilidade apresentadas durante a aula. Para o exercício, foi estabelecido um terreno de 67 × 134 m, localizado na Avenida Presidente Café Filho, na Praia do Meio, em Natal/RN. A partir dessas condicionantes, os grupos foram orientados a elaborar um esboço da proposta habitacional, aplicando ao exercício o que foi apresentado na etapa teórica.

As falas dos estudantes durante o desenvolvimento da atividade foram transcritas e analisadas com o auxílio do software QDA Miner, utilizado para a segmentação e codificação dos dados qualitativos. A análise foi realizada linha a linha, associando os trechos que expressavam intenções projetuais, dificuldades, tomadas de decisão e demais aspectos do processo de projeto aos códigos previamente definidos em uma árvore de categorias.

Após a codificação, os dados foram organizados e cruzados de modo a identificar aproximações e divergências entre os grupos, considerando os diferentes caminhos de

raciocínio mobilizados durante o desenvolvimento das propostas. Os segmentos codificados foram posteriormente sistematizados em matrizes organizadas nas categorias temas, intenções, barreiras e soluções, permitindo relacionar as intenções projetuais dos estudantes às dificuldads encontradas e às decisões adotadas para solucioná-las.

Resultados e Discussões

A conceituação de flexibilidade foi apresentada como uma qualidade espacial capaz de oferecer alternativas de uso e, no contexto habitacional, como um atributo com potencial para possibilitar mudanças antes da ocupação e adequações ao longo do tempo. Nesse momento, também foram discutidos os conceitos de polivalência e versatilidade (Graça apud Silva et al., 2024), considerando que a flexibilidade compreende tanto alterações físicas na edificação quanto a adaptabilidade no uso dos espaços.

Como referência projetual, a exposição teórica também contemplou o estudo de caso “Construye para Crecer 2017”, referente a um projeto habitacional incremental e modular localizado em Iquitos, Peru, desenvolvido pelos arquitetos Rafael Arana Parodi, Carlos Suasnabar Martínez, Amed Aguilar Chunga e Santiago Nieto Valladares. Foram apresentados desenhos de implantação urbana, cortes esquemáticos e, principalmente, as etapas do processo construtivo em madeira, evidenciando a progressividade da unidade habitacional, desde uma estrutura básica de 26 m² até suas expansões completas por módulos.

Os registros do processo projetual foram organizados em categorias de análise que sintetizam as intenções projetuais, as barreiras identificadas durante o desenvolvimento das propostas e as soluções elaboradas pelos estudantes. Essa sistematização permitiu analisar o percurso de construção das decisões projetuais, evidenciando como as ideias foram discutidas, reformuladas e consolidadas ao longo da atividade. A interpretação dos dados foi orientada pelo conceito de reflexão-na-ação, de Schön (2000), buscando compreender como os estudantes articulavam intenções, identificavam dificuldades e reformulavam suas decisões ao longo do processo projetual.

As Tabelas 1 e 2 apresentam a síntese do processo projetual desenvolvido pelos Grupos 01 e 02, respectivamente. Para cada tema discutido, foram identificadas as intenções projetuais, as principais dificuldades enfrentadas (barreiras) e as soluções adotadas durante o processo de concepção da proposta habitacional.

A partir dessa sistematização, a Tabela 3 apresenta uma comparação entre os processos criativos dos dois grupos, permitindo identificar aproximações e diferenças quanto às estratégias projetuais, às barreiras enfrentadas e às soluções desenvolvidas para incorporar princípios de flexibilidade na Habitação de Interesse Social.

Tabela 1: Processo projetual; Grupo 01

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os registros apresentados na Tabela 1 indicam que o processo criativo do Grupo 01 foi marcado por sucessivas reformulações das propostas à medida que novas limitações eram identificadas. As discussões demonstram que a incorporação da flexibilidade não ocorreu de forma imediata, exigindo a compatibilização entre aspectos urbanos, estruturais e ambientais. As principais barreiras estiveram relacionadas à ausência de domínio técnico sobre determinadas soluções construtivas e à influência de conhecimentos prévios, que inicialmente restringiram a exploração de alternativas mais flexíveis. Apesar dessas dificuldades, observa-se que o grupo desenvolveu estratégias capazes de responder aos problemas identificados.

Tabela 2: Processo projetual; Grupo 02

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise do processo criativo do Grupo 02 evidencia uma abordagem voltada à integração entre aspectos urbanos, ambientais e funcionais da Habitação de Interesse Social. Diferentemente do Grupo 01, cujas discussões concentraram-se na organização estrutural da unidade e na flexibilidade construtiva, este grupo direcionou seus esforços para a articulação entre desenho urbano, usos mistos e estratégias ambientais. As principais dificuldades estiveram relacionadas à definição da escala inicial do projeto, à compatibilização entre moradia, comércio e circulação de veículos, ao detalhamento técnico de sistemas construtivos sustentáveis e à limitação de tempo para aprofundar as soluções propostas. Ainda assim, asestratégias desenvolvidas demonstram a busca por integrar flexibilidade ativa, infraestrutura verde e conforto ambiental ao processo de projeto.

Tabela 03 – Comparação entre os processos projetuais dos Grupos 01 e 02

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A comparação entre os processos criativos dos dois grupos evidencia que, embora ambos tenham partido do mesmo contexto de projeto e recebido as mesmas diretrizes para o desenvolvimento da proposta habitacional, as estratégias adotadas refletem diferentes formas de interpretar e incorporar os princípios de flexibilidade e dos demais atributos da resiliência. Enquanto o Grupo 01 concentrou suas discussões na organização funcional do loteamento e na flexibilidade construtiva da unidade, priorizando a definição de um núcleo rígido associado a vedações leves e soluções voltadas ao conforto ambiental e à gestão de águas pluviais, o Grupo 02 direcionou o processo para aspectos relacionados ao desempenho ambiental, à integração de usos e à evolução da habitação ao longo do tempo, explorando estratégias como infraestrutura verde, telhado vegetado e flexibilidade ativa por meio da expansão da unidade.As estratégias desenvolvidas pelos dois grupos dialogam com os atributos da flexibilidade apresentados por Silva et al. (2024), especialmente a adaptabilidade, a multifuncionalidade e a ampliabilidade, ainda que tenham sido materializadas por meio de soluções projetuais distintas. No Grupo 01, esses atributos manifestaram-se principalmente na adoção da planta livre, das vedações leves e da possibilidade de reorganização espacial da unidade habitacional. No Grupo 02, observaram-se na previsão de expansões futuras, na incorporação de usos mistos e na concepção de espaços capazes de assumir diferentes funções ao longo do tempo. Dessa forma, os resultados indicam que os estudantes compreenderam a flexibilidade como um conceito

que extrapola a configuração interna da moradia, influenciando também decisões relacionadas ao desenho urbano, aos sistemas construtivos e às estratégias ambientais.

As barreiras identificadas também apresentaram características distintas. No Grupo 01, predominaram dificuldades relacionadas à definição estrutural, à integração de conhecimentos técnicos e à influência de experiências projetuais anteriores, que inicialmente limitaram a exploração de soluções mais flexíveis. Já o Grupo 02 enfrentou desafios associados à complexidade do raciocínio projetual, principalmente na compatibilização entre diferentes escalas de projeto, usos da habitação e estratégias ambientais, além das limitações impostas pelo tempo disponível para a atividade. Essas diferenças demonstram que a incorporação da flexibilidade não depende apenas do conhecimento conceitual, mas também da capacidade de articular simultaneamente aspectos urbanos, construtivos, ambientais e funcionais durante o processo de projeto.

Diante desse cenário, observa-se que o desenvolvimento das propostas favoreceu a construção e o refinamento do raciocínio projetual, permitindo que as dificuldades encontradas fossem gradualmente analisadas e convertidas em soluções de projeto. Esse resultado reforça a compreensão do projeto arquitetônico como uma atividade iterativa, na qual problemas e soluções evoluem simultaneamente por meio de sucessivos ciclos de reflexão e representação, conforme discutem Cross (2011), Schön (2000), Kowaltowski et al. (2006) e Lebahar (1999). As barreiras identificadas durante a atividade, longe de representarem apenas limitações, estimularam a revisão de hipóteses e o amadurecimento das decisões projetuais, evidenciando que a incorporação de estratégias de flexibilidade exige a articulação entre aspectos urbanos, construtivos, ambientais e funcionais. Ao mesmo tempo, os resultados apontam para a necessidade de aprofundar, no ensino de projeto, conteúdos relacionados ao desempenho das soluções construtivas, à integração entre diferentes áreas do conhecimento e à aplicação prática dos conceitos de resiliência e flexibilidade em Habitações de Interesse Social.

Conclusão

A experiência demonstra que o atendimento de metas de resiliência, com foco em diretrizes de flexibilidade arquitetônica, apresenta como principais potencialidades a capacidade de articular esses novos conteúdos com os embasamentos teóricos e práticos adquiridos em componentes curriculares cursados anteriormente. Essa articulação multidisciplinar facilitou a aplicação de soluções de flexibilidade passiva (como plantas livres estruturadas por núcleos rígidos de serviços) e a integração de infraestruturas verdes e azuis voltadas ao conforto ambiental, amparadas por conhecimentos prévios de disciplinas. Por outro lado, as principais barreiras em relação aos conteúdos residem na falta de conhecimento técnico específico para detalhar e especificar sistemas construtivos e tecnológicos complexos, o que se refletiu em hesitações quanto ao dimensionamento estrutural dos pilares fixos e ao funcionamento detalhado de dispositivos de captação pluvial. Ademais, a restrição de tempo disponível durante a atividade configurou-se como um fator limitante para o aprofundamento técnico dessas estratégias inovadoras.

Os conteúdos de resiliência e as diretrizes de flexibilidade aplicadas à Habitação de Interesse Social (HIS) foram trabalhados de maneira incremental durante o componente curricular. No primeiro momento, focou-se na fundamentação teórica e no desenvolvimento do conteúdo conceitual por meio de aulas expositivas; na sequência, foi possível iniciar a aplicação prática dessas diretrizes por meio de uma primeira experiência de projeto em grupo. Apesar de essa aplicação de projeto ter sido de caráter inicial, a transição entre a teoria e o exercício prático permitiu que as novas metas fossem incorporadas ao raciocínio dos estudantes, servindo de base para o amadurecimento dessas soluções nas etapas subsequentes de projeto.

Por fim, destaca-se que o método de análise qualitativa empregado, com o suporte do software QDA Miner Lite para a codificação sistemática das falas gravadas e transcritas, viabilizou o mapeamento do processo de tomada de decisão e a sistematização das discussões e das respectivas soluções adotadas. Essa sistematização demonstra que a introdução de conceitos contemporâneos e complexos no ensino de arquitetura se beneficia diretamente do acompanhamento do processo de projeto, abrindo caminhos para que pesquisas futuras investiguem, de forma contínua, a evolução do pensamento projetual em novos cenários de ensino de HIS e áreas de fragilidade ambiental.

Referências

CROSS, N. Design Thinking: Understanding how designers think and work. London/New York: Bloomsbury Academic, 2011.

LEBAHAR, J. C. Analyse congnitive de la conception et de sa pédagogie. In: Approche didactique de l'enseignement du projet en architecture. Marseille: École d'Architecture de Marseille-Luminy, 1999.

KOWALTOWSKI, D. et al. Reflexão sobre metodologias de projeto arquitetônico. Ambiente Construído. v. 6, n. 2, p. 12, abr./jun. 2006.

Silva, H.; Faria, H. Rodrigues, C. A RESILIÊNCIA EM PROJETOS HABITACIONAIS EM CONCURSOS DE ARQUITETURA: Uma ferramenta para estudos de caso em Portugal e no Brasil (2013-2023). In: 5º CIHEL. Lisboa, 2024

BAYONA, Delia. Arquitetos propõem 120 habitações sociais incrementais e flexíveis para Iquitos, Peru. ArchDaily Brasil, 12 fev. 2018. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/pt/888895/arquitetos-propoem-120-habitacoes-sociais-incrementais-e-flexiveis-para-iquitos-peru. Acesso em: 26 ago. 2026.

Anexos



Tabela 1: Processo projetual; Grupo 01



Tabela 2: Processo projetual; Grupo 02



Tabela 03 – Comparação entre os processos projetuais dos Grupos 01 e 02

CÓDIGO: HS1569

AUTOR: ANNA CECILIA ARAUJO MACEDO

ORIENTADOR: LUCIANA DE MEDEIROS

TÍTULO: Explorando conceitos e projetos de edifícios de atenção à saúde

Resumo

O projeto arquitetônico de Estabelecimentos Assistenciais de Saúde (EAS) vem se transformando diante de desafios contemporâneos, como novas tecnologias, novos tratamentos e mudanças climáticas. Com base nas diretrizes da Organização Mundial da Saúde para esses edifícios (WHO, 2023), os projetos devem atender a requerimentos técnicos e funcionais, mas também oferecer condições de adaptação ao futuro. Nesse contexto, esta pesquisa investigou conceitos envolvidos nos projetos de EAS, sobretudo resiliência e sua relação com flexibilidade, por meio de abordagem qualitativa e exploratória em três etapas: (1) revisão bibliográfica sistemática nas bases SCOPUS e Web of Science, resultando em 9 artigos selecionados; (2) definição de categorias analíticas a partir de Vieira (2015); e (3) estudo piloto com projetos hospitalares publicados no ArchDaily. A revisão indica que os conceitos são interdependentes, ligados à reconfiguração espacial ativa, à separação entre sistemas estáveis e mutáveis do edifício e a espaços de transição. No estudo piloto, notou-se a ausência do termo "resiliência" nos textos analisados e a recorrência de "flexibilidade", associada a espaços polivalentes e estrutura independente das vedações. Conclui-se que a flexibilidade já é consolidada no discurso projetual de EAS, enquanto a resiliência segue pouco explorada, apontando para a continuidade da pesquisa.

Palavras-chave: arquitetura hospitalar; projeto; resiliência; flexibilidade

TITLE: Exploring concepts and projects of healthcare facilities

Abstract

The architectural design of healthcare facilities (EAS) has been undergoing changes in response to contemporary challenges such as new technologies, new treatments, and climate change. Based on the World Health Organization's guidelines for these buildings (WHO, 2023), projects must meet technical and functional requirements while also offering conditions for future adaptation. In this context, this research investigated concepts involved in EAS projects, particularly resilience and its relationship with flexibility, through a qualitative and exploratory approach carried out in three stages: (1) a systematic literature review in the SCOPUS and Web of Science databases, resulting in 9 selected articles; (2) the definition of analytical categories based on Vieira (2015); and (3) a pilot study with hospital projects published on ArchDaily. The review indicates that the concepts are interdependent, linked to active spatial reconfiguration,

the separation between stable and mutable building systems, and transition spaces. In the pilot study, the term "resilience" was absent from the analyzed texts, while "flexibility" recurred frequently, associated with multipurpose spaces and structures independent from enclosures. It is concluded that flexibility is already consolidated in the design discourse of EAS, while resilience remains underexplored, pointing to the need for further research.

Keywords: hospital architecture; project; resilience; flexibility

Introdução

O projeto de edifícios de atenção à saúde não constitui uma prática recente, mas sua concepção vem passando por profundas transformações contemporâneas para responder aos desafios atuais. Tradicionalmente, o planejamento de Estabelecimentos Assistenciais de Saúde (EAS) esteve muito atrelado ao atendimento de requerimentos técnicos e funcionais rígidos e intrínsecos à complexidade física de cada projeto. No entanto, esse paradigma tradicional tem se expandido diante de demandas urgentes da sociedade moderna, como o surgimento de novos tratamentos de saúde e as mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global. Nesse cenário de transição, as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2023) surgem como o referencial estruturante e ponto de partida principal desta investigação, propondo parâmetros para conceber edifícios de saúde mais humanos, seguros e preparados para o futuro, integrando o espaço interno ao seu entorno. Essas diretrizes da OMS contemplam a integração do prédio com a comunidade, ambientes naturais e sociais (funções urbanas, serviços, comodidades, estratégias de acessibilidade, dentre outros tópicos), mas também o interior do hospital, inserindo aspectos técnicos, estruturais e operacionais (flexibilidade, resiliência, layouts inovadores, dentre outros quesitos). Apesar do reconhecido valor das diretrizes internacionais da OMS para a qualificação dos ambientes de saúde, identifica-se uma lacuna na definição de alguns conceitos, em especial, o de resiliência. Embora o documento aponte para a necessidade de transformação constante das edificações, a aplicação prática de eixos fundamentais como a resiliência e a flexibilidade no projeto pode ser melhor compreendida. Assim, esta pesquisa busca investigar os conceitos envolvidos na elaboração de EAS na contemporaneidade, especialmente os que se relacionam com a preparação para o futuro. A metodologia adotada incluiu revisão bibliográfica para compreensão de alguns conceitos utilizados na área e definição de categorias analíticas para o estudo piloto de análise de projeto.

Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas principais: Revisão de literatura, incluindo o guia da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2023), seguida de revisão sistemática sobre conceitos relacionados ao hospital do futuro, como resiliência e sua relação com flexibilidade. Para tanto, foram consultadas as bases SCOPUS e Web of Science, aplicando-se filtros para a busca de artigos de revisão (review article), em regime de acesso aberto (open access), no recorte temporal entre 2020 e 2025. A busca estruturou-se a partir de dois principais strings de buscas: “Hospital Architecture” and “flexibility”

e “Hospital architecture” and “resilience”. Definição das categorias de análise de projeto: considerando o caráter exploratório desta investigação e a possibilidade de utilização do mesmo método para análise de projetos das etapas seguintes, optou-se pelas categorias propostas por Vieira (2015), que abrangem aspectos associados à forma, uso e estrutura da edificação, mas também sua relação com o contexto. Estudo piloto e aproximação com projetos arquitetônicos de EAS: a partir do site ArchDaily, especializado em arquitetura e de acesso livre, buscou-se projetos integrantes da categoria arquitetura hospitalar e subcategorias “Hospital” e “Centros de saúde”, entre os anos de 2020 e 2025. Foi feita a leitura de todos os textos explicativos dos projetos dentro desse intervalo de tempo observando a incidência dos termos “Resiliência” e “Flexibilidade”, de modo a compreender de que maneira esses conceitos estão rebatidos nos projetos.

Resultados e Discussões

A fase de revisão de literatura gerou a sistematização de conteúdos sobre flexibilidade e resiliência em ambientes de atenção à saúde, conforme critérios de buscas já mencionados. Durante a etapa em que se pesquisou por flexibilidade, foram encontrados 462 resultados, mas a aplicação dos filtros estabelecidos apontou 43 artigos acerca do assunto. Destes, apenas 5 (Pilosof, 2021; Capolongo et al, 2020; Brambilla, 2021; Syafinaz et al, 2022 ; Van Heel et al, 2023) foram selecionados para leitura completa após leitura dos resumos, já que o restante não apresentava ligação direta com o projeto arquitetônico. Nas buscas por resiliência em EAS, foram encontrados 206 resultados e a pré-seleção de 46 artigos após a aplicação dos filtros, sendo que apenas 4 (Taylor et al, 2022; Jaušovec et al, 2023; Gola et al, 2024; Memari et al, 2026) foram selecionados para a leitura completa pelos mesmos motivos já indicados. A organização desse material foi feita com uso do excel e fichas com informações relevantes. De um modo geral, observamos que a resiliência e a flexibilidade em ambientes de atenção à saúde se relacionam, pois ambos tratam de estratégias integradas de preparação para o futuro, denominada future-proofing, concebidas para assegurar a adaptabilidade da infraestrutura física diante de transformações demográficas, tecnológicas e ambientais com o mínimo de interrupção operacional. Essa capacidade de preparação para o futuro, em EAS, está relacionada a desastres naturais e possíveis pandemias, destacando a flexibilidade como uma das suas principais ferramentas (Capolongo et al, 2020). De acordo com os autores, a resiliência depende diretamente dessa capacidade de reconfiguração e adaptação espacial ativa para garantir a segurança dos pacientes e o controle de infecções. Sob a ótica de Memari et al. (2026), por exemplo, os hospitais são infraestruturas em constante mutação, o que exige um design estratégico, com programas arquitetônicos menos rígidos, passível de conciliar os dois conceitos. Conforme discute Pilosof (2021), a flexibilidade contrapõe o "ajuste ideal" da especialização funcional ao conceito de "ajuste frouxo" (loose fit). Essa abordagem viabiliza mudanças sociais e tecnológicas rápidas por meio do planejamento de cenários e da separação de sistemas (dividindo o que é estável do que é mutável no edifício). Para Liesbeth van Heel et al. (2023), a resiliência não é um atributo exclusivamente físico, mas sim a combinação de flexibilidade, robustez e adaptabilidade da equipe de saúde. Nesse contexto de conversão rápida do layout, Gola et al. (2024) destacam o papel estratégico dos espaços de transição ou amortecimento (buffer spaces). Estes espaços atuam como ferramentas espaciais híbridas que permitem ao hospital expandir-se, segregar fluxos e alternar regimes de funcionamento, materializando a convergência

prática entre a flexibilidade física e a resiliência operacional do edifício. Esses aspectos coincidem com alguns dos mencionados no guia dos Hospitais do futuro (WHO, 2023), em especial com flexibilidade. No que diz respeito à aproximação com os projetos arquitetônicos e realização do estudo piloto, vale destacar que a palavra "resiliência" não foi encontrada nos textos explicativos dos projetos expostos no ArchDaily, dentro dos critérios escolhidos para as buscas e compreensão inicial do material. O termo "flexibilidade" apareceu em alguns projetos, inclusive, nos dois escolhidos para o teste piloto, escolhidos em virtude de serem edifícios com nível de complexidade diferentes. A análise foi feita com base em algumas categorias propostas por Vieira (2015): contexto, ocupação, permeabilidade, fluxos e estrutura. Nela, percebem-se espaços polivalentes, mais amigáveis, com integração com a natureza, com estrutura separada das vedações, essas últimas mais leves, com possibilidade de mudanças.

Conclusão

Após a realização da pesquisa, ficou evidente que alguns conceitos estudados em arquitetura, como a flexibilidade, continuam sendo visualizados em projetos de EAS, devido às exigências de ajustes constantes desses edifícios para incorporação de novas tecnologias, novos tratamentos e procedimentos médicos. Nota-se também que a resiliência é aspecto já incluído nas pesquisas internacionais sobre o futuro dos EAS, mas sua abordagem se dá de modo muito breve no Guia da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2023), talvez por se tratar de um tema mais recente. A respeito da ausência do termo resiliência no material pesquisado no ArchDaily, pode-se dizer que essa falta não indica necessariamente que esse aspecto não se faz presente nos projetos, mas que não houve um destaque para este critério nos textos publicados. Esse fato aponta para a necessidade de continuação desse tipo de análise, já que o estudo piloto auxiliou a verificação geral do material e o teste do método. Por fim, esse estudo proporcionou ao bolsista de iniciação científica o desenvolvimento de habilidades críticas e de sistematização científica essenciais à sua formação.

Referências

Angelique Taylor, Michele Murakami, Soyon Kim, Ryan Chu, and Laurel D. Riek. Hospitals of the Future: Designing Interactive Robotic Systems for Resilient Emergency Departments. Proc. ACM Hum.-Comput. Interact, v6, CSCW2, Article 442, 2022, https://doi.org/10.1145/3555543 BRAMBILLA, Andrea; SUN, Tian-zhi; ELSHAZLY, Waleed; GHAZY, Ahmed; BARACH, Paul; LINDAHL, Göran; CAPOLONGO, Stefano. Flexibility during the COVID-19 Pandemic Response: Healthcare Facility Assessment Tools for Resilient Evaluation. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 18, n. 21, artigo 11478, 2021. DOI: 10.3390/ijerph182111478. CAPOLONGO, Stefano; GOLA, Marco; BRAMBILLA, Andrea; MORGANTI, Alessandro; MOSCA, Erica Isa; BARACH, Paul. COVID-19 and Healthcare Facilities: a Decalogue of Design Strategies for Resilient Hospitals. Acta Biomedica, v. 91, supl. 9, p. 50-60, 2020. DOI: 10.23750/abm.v91i9-S.10117. Gola M, Johnson AA, La Milia DI, Cadeddu C, Bardini F, Bianconi B, Bisceglia R, Pumpo MD, Genovese C, Grieco A, Piras G, Guerra R, Damiani G, Favaretti C, Montagna MT, Capolongo S, Ricciardi W. Rethinking the Healthcare Facilities: The Role of the Buffer

Space. Health Environments Research & Design Journal, v. 17, n. 2. p. 24-37, 2024, doi: 10.1177/19375867231222563 JAUŠOVEC, Marko; GABROVEC, Branko. Architectural Evaluation of Healthcare Facilities: A Comprehensive Review and Implications for Building Design. Buildings, v. 13, n. 12, artigo 2926, 2023. DOI: 10.3390/buildings13122926. MEMARI, Sanaz; KOCATURK, Tuba; LOZANOVSKA, Mirjana; ANDREWS, Fiona; TUCKER, Richard. Architect Insights: Implications and Barriers of Future-Proofing Hospitals. Health Environments Research & Design Journal, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 109-126, 2026.Disponível em: https://doi.org/10.1177/19375867251374676. PILOSOF, Nirit Putievsky. Building for Change: Comparative Case Study of Hospital Architecture. Health Environments Research & Design Journal, v. 14, n. 1, p. 47-60, 2021. DOI: https://doi.org/10.1177/1937586720927026. TAJUDIN, Nur Faridatull Syafinaz Ahmad; AMAT, Rohayah Che. The Covid-19 Pandemic: Impacts on the Hospital Environment and Spatial Design. International Journal of Built Environment and Sustainability, v. 9, n. 2-2, p. 5-14, 2022. DOI: 10.11113/ijbes.v9.n2-2.1017. VAN HEEL L, Pretelt M, Herweijer M, van Oel C. Perspectives on Assessing the Flexibility of Hospitals for Crisis Mode Operations: Lessons From the COVID-19 Pandemic in the Netherlands. HERD: Health Environments Research & Design Journal. 2023;17(1):34-48. doi:10.1177/19375867231201633 VIEIRA, Júlio Luiz. Vias de aproximação para uma leitura da condição espacial na arquitetura. 2015. 311 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo – Área de Concentração: Projeto de Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. WORLD HEALTH ORGANIZATION. Hospitals of the future: a technical brief on re-thinking the architecture of hospitals. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2023. Documento: WHO/EURO:2023-7525-47292-69380.

Anexos



Resultados do estudo piloto seguindo as categorias indicadas; Respectivamente Pólo de Saúde de Carcavelos e Hospital Infantil Universitário de Zurique Hospital Infantil Universitário de Zurique

CÓDIGO: HS1662

AUTOR: ANNA CAROLINE ADRIANO DE MEDEIROS

ORIENTADOR: BERNARDO NASCIMENTO SOARES

TÍTULO: Contribuição para construção de uma cartografia social dos assentamentos informais e práticas de planejamento popular em Natal.

Resumo

Os assentamentos informais constituem uma realidade das cidades brasileiras, sendo ele reflexo de dinâmicas socioespaciais excludentes e do sistema capitalista. Em Natal/RN, esse cenário se reproduz, tornando indispensável a compreensão desses territórios. Nesse contexto, a pesquisa intitulada “Contribuição para construção de uma cartografia social dos assentamentos informais e práticas de planejamento popular em Natal” tem como objetivo investigar, sistematizar e mapear informações sobre essas áreas. Além disso, a cartografia social se torna uma aliada, como um instrumento fundamental, ao viabilizar a produção de conhecimento a partir das vivências e da perspectiva direta da própria população local.

Palavras-chave: Assentamentos informais. Caracterização. Natal. Cartografia social.

TITLE: Contribution to the construction of a social cartography of informal settlements and grassroots planning practices in Natal.

Abstract

Informal settlements are a reality in Brazilian cities, reflecting exclusionary socio-spatial dynamics and the capitalist system. In Natal/RN, this scenario is reproduced, making it essential to understand these territories. In this context, the research titled 'Contribution to the construction of a social cartography of informal settlements and grassroots planning practices in Natal' aims to investigate, systematize, and map information about these areas. Furthermore, social cartography becomes a key ally and a fundamental tool by enabling the production of knowledge based on the lived experiences and direct perspectives of the local population.

Keywords: Informal settlements. Characterization. Natal. Social cartography.

Introdução

A pesquisa intitulada “Cartografia em conflito: Identificação, mapeamento e caracterização dos assentamentos informais e das práticas de planejamento popular’’ tem como intuito dar continuidade a um trabalho que já vinha sendo realizado no ano anterior, que tem como objetivos identificar e examinar dados sobre os assentamentos informais de Natal/RN, que ajudem na geração de mapas que auxiliam na análise e na classificação tipológica dessas comunidades. Além disso, a cartografia social ganha um espaço essencial, onde se busca estabelecer um diálogo com a comunidade de determinado assentamento informal, para dar voz a população, e entender a história, as vivências, as lutas, os conflitos, os desafios, as conquistas desses territórios a partir da visão de quem cria, constrói e vive diariamente nesse espaço. Ademais, esses dados podem ajudar no planejamento urbano, auxiliando na formação de políticas públicas para a cidade, e também relevante para o campo acadêmico.

Metodologia

A etapa inicial da pesquisa foi marcada por uma revisão bibliográfica e documental para a formação de uma base acerca da ocupação e história das favelas no Brasil e em Natal/RN, a partir desse processo buscou-se a consolidação de compressão e conhecimento dos aspectos básicos e históricos dos assentamentos populares.

O mapeamento dos assentamentos informais foi feito a partir do software QGIS, e foi levantado a partir de dados oficiais, através do site da Secretária Municipal do Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB), dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e também pela Prefeitura de Natal. A partir desses dados, foram desenvolvidos mapas que ajudaram na observação da análise morfológica, ambiental, socioeconômica, e a da infraestrutura de cada comunidade.

A metodologia utilizada para a caracterização dos assentamentos de Natal está localizada no “Guia para o Mapeamento e Caracterização de Assentamentos Precários” desenvolvida em 2010 pelo Ministério das Cidades, são utilizadas 6 variáveis tipológicas para caracterizar esses territórios, sendo elas: o acesso à moradia, terreno, localização, traçado urbano, infraestrutura e a condição habitacional (MCIDADES, 2010). A partir dessas variáveis, se define a classificação predominante de determinado Assentamento Popular, onde sua tipologia pode ser favela, loteamento irregular, cortiço ou conjunto habitacional.

Inicialmente, foi criada uma ficha de caracterização de assentamento popular no QGIS, para mapear os principais dados obtidos nele, como domicílios de acordo com o Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (CNEFE), a delimitação e domicílios do IBGE, a renda, o histórico da comunidade, as edificações, o parcelamento, o traçado viário, a infraestrutura existente, a topografia, o zoneamento, características ambientais e o risco. Em paralelo, foi escolhida uma amostra de 28 comunidades, que abrange as quatro regiões administrativas da cidade de Natal, para serem classificadas, baseando-se tanto nos dados oficiais inseridos nas fichas quanto em referências bibliográficas acadêmicas que discorrem sobre o determinado assentamento informal analisado.

Resultados e Discussões

Os assentamentos populares são fruto de um sistema capitalista, em que o processo industrial se destaca por exercer um papel fundamental para a intensa exploração da força de trabalho e exclusão social de uma parcela da população (Maricato, 1995, p. 44). Essas comunidades, frequentemente, sofrem com o descaso e esquecimento nas agendas dos governantes, além disso, parte da sociedade desenvolve um preconceito baseado em um estereótipo acerca desses territórios e da sua população.

O mapeamento dos assentamentos informais em Natal/RN é desenvolvido pelos órgãos públicos desde 1992, a partir do Plano de Ação (PA), com manchas, porém sem a identificação das comunidades (Soares, Souza, Cadó, 2024). Durante anos, esses assentamentos existiram sem nenhum reconhecimento ou legitimidade, o que contribuiu muitas vezes para a escassez de políticas públicas que melhorem as condições de vida dessa população e promovam os direitos básicos assegurados atualmente pela Constituição Federal de 1988.

A partir de uma análise desses assentamentos, se pode notar o fato de alguns elementos serem essenciais para a formação desses territórios, como por exemplo, o Rio, é importante para a comunidade do mosquito, beira rio, passo da pátria e a comunidade do maruim, já a praia se tornar primordial para algumas comunidades situadas ao leste e também algumas localizadas na zona norte da cidade, esses elementos são peças fundamentais para garantir a subsistência de alguns moradores dessas localidades.

As tipologias presente para a caracterização dos assentamentos precários no “Guia para o Mapeamento e Caracterização de Assentamentos Precários” do Ministério das Cidades que baseiam a pesquisa são: cortiços, favelas, loteamentos irregulares e conjuntos habitacionais, cada uma possui suas características básicas associadas às variáveis tipológicas e a partir delas se define a classificação predominante da comunidade.

A pesquisa atualmente identifica 99 assentamentos irregulares em Natal/RN, essas comunidades serão todas estudadas e classificadas de acordo com a metodologia do Ministério das Cidades. De acordo com o Censo 2022 do IBGE, 19,44% da população de Natal se encontra localizada em favelas, com 146.017 habitantes nessas áreas, totalizando uma área de ocupação considerável, onde às vezes pode existe carência de uma infraestrutura básica ou equipamentos públicos que atendam a demanda da população.

Entre a Rua do motor e a África

A partir de uma disciplina optativa ofertada pelo curso de arquitetura e urbanismo, denominada ‘’Tópicos especiais em projeto urbano e territorial 03” ministrada pela professora Dr. Amíria Bezerra Brasil e o professor Dr. Bernardo Nascimento Soares, onde o objetivo principal era produzir propostas conceituais de urbanização de favelas, através de cenários urbanísticos e habitacionais, foi possível visitar 4 assentamentos

populares. A turma foi dividida em 4 grupos e cada grupo se responsabilizou por uma comunidade inserida na cidade de Natal/RN. Foram escolhidos um assentamento popular de cada Região Administrativa da cidade, entre eles: África, Vila de Ponta Negra, Rua do Motor e Novo Horizonte.

A comunidade da África está localizada na Zona Administrativa Norte da cidade, no bairro da Redinha, e está inserida em uma parte da Zona de Proteção Ambiental (ZPA) 9, além da planície fluvial do Rio Doce, considerada uma Área de Preservação Permanente (APP), além disso, uma parte da ocupação dessa comunidade está inserida sobre as dunas.

Essa comunidade é reconhecida e regulamentada como Área Especial de Interesse Social (AEIS), a área carece de infraestrutura de qualidade, além de espaços de convivência, creches e escolas. Ademais, o território sofre com a ausência de transporte público que adentre na comunidade, quando os moradores necessitam se deslocar de ônibus ou micro-ônibus é necessário percorrer grandes distâncias até a parada para embarcar no transporte público.

Durante a visita a comunidade da África foi possível dialogar e escutar a liderança comunitária “Carcará”, que comentou sobre os entraves e as potencialidades existentes no território, e também enfatizou o esquecimento do poder público com o espaço. Ele contou um pouco sobre a história inicial da comunidade, percorreu com os discentes por uma parte da favela, mostrando e esclarecendo as vivências e realidades daquele espaço, adicionando informações enriquecedoras para a pesquisa e também para a disciplina.

A Rua do Motor está localizada na Região Administrativa da zona Leste da cidade, no bairro da Praia do Meio, e está inserida na AEIS Jacó/Rua do Motor A e B, devido a sua localização privilegiada, essa área sofre com a pressão do mercado imobiliário. A comunidade carece de um equipamento público de saúde, necessitando se deslocar para outras localidades quando apresentam algum problema de saúde ou necessitam marcar consulta médica, além da ausência de praças inseridas no seu território, e as que estão disponíveis nas proximidades precisam de uma requalificação.

Durante a visita a Rua do Motor foi possível dialogar com a liderança comunitária chamada “Balaio’”, onde o mesmo apresentou o território a partir do seu olhar e vivência, destacando as conquistas obtidas através da luta popular, como por exemplo, a construção da escadaria, a iluminação de LED, mas também, destacou os entraves existentes no território, como o problema do lixo localizado nos quintais das casas, a falta de acessibilidade, a falta de uma Unidade Básica de Saúde (UBS) e de espaços de convivência.

A cartografia social desempenha um papel primordial na pesquisa, porém, devido a necessidade de um reajuste das atividades da pesquisa ela ainda não foi desenvolvida, mas ela faz parte das próximas discussões e etapas. Ela será aplicada em pelo menos um assentamento de cada região administrativa da cidade de Natal/RN, buscando escutar e dialogar com as comunidades sobre suas percepções acerca do território em que elas estão inseridas. Através dessa ferramenta social, a participação da comunidade é dada como um principais objetivos dessa cartografia, que busca entender melhor o olhar, a história, o cotidiano e os conflitos existentes naqueles territórios, priorizando a escuta e o diálogos com as pessoas que constroem esse espaço.

Conclusão

Os assentamentos informais são uma realidade nas cidades brasileiras, sendo diversos em suas formas, tamanhos, características e tipologias. Em Natal, os assentamentos informais fazem parte da realidade da cidade, sendo de fundamental a identificação, mapeamento e caracterização dessas comunidades, já que essas informações podem servir como instrumento de luta, e também ajudar na implementação de políticas públicas no município.

As fichas de caracterização dos assentamentos populares de Natal/RN da primeira amostra ainda estão em fase de desenvolvimento, mas a partir delas já é perceptível que elas podem ser relevantes para aqueles que precisam pesquisar sobre esse tema, podendo se visualizar as variáveis tipológicas que ajudam a entender e compreender um pouco da análise morfológica, ambiental, socioeconômica e a infraestrutura do espaço.

Ao final desse ano de pesquisa, coordenada pela professora Dr. Amíria Bezerra Brasil e o professor Dr. Bernardo Nascimento Soares e com participação de quatro discentes, foi perceptível, apesar dos contratempos, que a mesma vem cumprindo com um dos seus principais objetivos, no caso, a identificação, o mapeamento e a caracterização dos assentamentos informais. Ao longo do processo, foi necessário realizar alguns ajustes no cronograma de pesquisa, no que tange o desenvolvimento da construção de uma cartografia social e os trabalhos de campo nas comunidades, que contribuirão ainda mais para as informações e dados obtidos, e podem ajudar no desenvolvimento de políticas públicas, e garantir o reconhecimento e legitimidade desses territórios a partir das visões daqueles que vivem e constroem eles cotidianamente.

Referências

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. **Guia para o mapeamento e caracterização de assentamentos precários.** Brasília: Ministério das Cidades, 2010. 82 p. ISBN 978-85-7958-015-4.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Panorama do Censo 2022: indicadores.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/indicadores.html?localidade=2408102&tema=1. Acesso em: 30 ago. 2026.

MARICATO, Erminia. **Metrópole na periferia do capitalismo: ilegalidade, desigualdade e violência.** 1. ed. São Paulo: Hucitec, 1996. 296 p.

NATAL, Prefeitura Municipal do. Lei Complementar nº 208 de 07 de março de 2022. **Dispõe sobre o Plano Diretor de Natal e dá outras providências.** Natal, 2022.

NATAL. Secretaria Municipal de Planejamento. Instituto de Planejamento Urbano de Natal. **Relatório de Situação das Favelas de Natal.** Natal, 1987.

SOARES, Bernardo Nascimento; CADÓ, Júlia Cláudia de Araújo; e OLIVEIRA, Daniel Victor Fernandes. **Entre Casebres, cabanas e choupanas: vestígios e indícios da origem da favelização em Natal (Rn), 1890-1930.** In: Anais do 18º Seminário Nacional de História da Cidade e do Urbanismo (SHCU). Natal, 2024. Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/18-shcu-seminario-historia-cidade-urbanismo/999141-entre-casebres-cabanas-e-choupanas--vestigios-e-indicios-da-origem-da-favelizacao-em-natal(rn)-1890-1930/. Acesso em: 27 ago. 2026.

SOARES, Bernardo Nascimento; SOUZA, Iago Felipe; CADÓ, Júlia Cláudia de Araújo. **Imprecisões cartográficas: favelas de Natal/RN.** In: Anais do IV UrbFavelas. São Paulo, 2024. Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/ivurbfavelas/893576-imprecisoes-cartograficas--favelas-de-natalrn. Acesso em: 26 ago. 2026.

Anexos



Figura 01 - Interface do software QGIS com a base de dados georreferenciadas, desenvolvidas pelos discentes.



Figura 02 - Ficha de caracterização do assentamento de Cidade Praia com mapas desenvolvidos a partir do software QGIS.



Figura 03 - Ficha de caracterização do assentamento de Cidade Praia com caracterização e classificação, desenvolvida a partir do software QGIS.

CÓDIGO: HS1670

AUTOR: JOSE EDILSON MUNIZ DOS SANTOS

ORIENTADOR: AMIRIA BEZERRA BRASIL

TÍTULO: Mapeamento e caracterização dos assentamentos informais de Natal

Resumo

A urbanização brasileira, marcada pela coexistência entre cidade formal e informal, consolidou territórios desiguais, nos quais os assentamentos informais permanecem pouco reconhecidos pelos instrumentos oficiais de planejamento. Em Natal/RN, essa realidade se expressa na diversidade de delimitações e informações produzidas por diferentes órgãos, dificultando o reconhecimento desses territórios e a formulação de políticas públicas focais. O projeto Cartografia em conflito: mapeamento e caracterização dos assentamentos informais e das práticas de planejamento popular em Natal/RN parte dessa lacuna para identificar, mapear e caracterizar assentamentos informais nas quatro Regiões Administrativas da cidade. Em um ano de pesquisa, foram articulados levantamento bibliográfico e documental, bases cartográficas em SIG (UTM, fuso 25S), dados do IBGE, Prefeitura de Natal, SEMURB e MapBiomas, além de referências e levantamentos orientados por fichas de caracterização. A pesquisa resultou na revisão e ampliação de delimitações territoriais e na identificação de assentamentos ainda não reconhecidos pelos dados oficiais, evidenciando divergências entre diferentes instrumentos e fontes. A sistematização de dados sobre moradia, parcelamento, infraestrutura, renda, topografia, risco e traçado urbano contribui para qualificar o conhecimento sobre esses territórios, subsidiar processos de regularização e políticas públicas.

Palavras-chave: Assentamentos informais. Favela. Cartografia. Natal/RN.

TITLE: Cartography in conflict: mapping and characterization of informal settlements and popular planning practices in Natal, Brazil

Abstract

Brazilian urbanization, marked by the coexistence of formal and informal urban areas, has produced unequal territories in which informal settlements remain poorly recognized by official planning instruments. In Natal, Rio Grande do Norte, this reality is reflected in the diversity of territorial delimitations and information produced by

different public agencies, hindering the recognition of these territories and the formulation of targeted public policies. The project Cartografia em conflito: mapeamento e caracterização dos assentamentos informais e das práticas de planejamento popular em Natal/RN addresses this gap by identifying, mapping, and characterizing informal settlements across the city's four Administrative Regions. Over one year of research, bibliographic and documentary reviews were combined with GIS-based cartographic data (UTM, zone 25S), information from IBGE, the Municipality of Natal, SEMURB, and MapBiomas, as well as field surveys guided by characterization forms. The research resulted in the revision and expansion of territorial delimitations and the identification of settlements not yet recognized by official data, revealing discrepancies among different planning instruments and information sources. The systematization of data on housing, land subdivision, infrastructure, income, topography, risk, and urban layout contributes to improving knowledge of these territories, supporting regularization processes and public policies,

Keywords: Informal settlements. Slum. Cartography. Natal/RN.

Introdução

A urbanização brasileira se desenvolveu de forma estruturalmente desigual, caracterizada pela coexistência de cidades formais e informais, num processo de "urbanização de baixos salários" (Maricato, 1995). Em Natal, esse fenômeno não diverge do panorama nacional, com assentamentos informais consolidados desde o início da formação urbana, hoje distribuídos pelas quatro Regiões Administrativas e concentrando populações sob precariedade habitacional.

Embora existam instrumentos históricos de planejamento, como o Plano Local de Habitação de Interesse Social (PLHIS, 2004) e o Plano Estratégico Municipal para Assentamentos Subnormais (PEMAS, 2001), persiste uma lacuna teórica e operacional na caracterização fina e precisa dessas áreas. A delimitação estatística adotada pelo IBGE, anteriormente sob o conceito de Aglomerados Subnormais e redefinida para Favelas e Comunidades Urbanas, frequentemente apresenta divergências em relação às delimitações identificadas na pesquisa, tal qual o reconhecimento proposto pelo Plano Diretor de Natal (PDN,2022). Tais discrepâncias comprometem o planejamento e a implementação de políticas públicas, pois esses dados falham em capturar as especificidades morfológicas, geomorfológicas, ambientais e físico-territoriais locais, não por uma deficiência de análise, mas por um escopo de processamento diferente, em que a pesquisa tenta suprir a carência no escopo local de análise através do agregamento de diversas produções acadêmicas da região.

A justificativa desta pesquisa fundamenta-se justamente nessa necessidade de um olhar mais focal e personalizado para cada assentamentos informal, utilizando uma metodologia baseada no Guia para o Mapeamento e Caracterização de Assentamentos Precários do Ministério das Cidades (2010), que fundamenta uma análise através de classificação de favelas com participação ativa dos municípios e de redes locais de pesquisa como caminho para qualificar os cadastros nacionais, identificar demandas de infraestrutura e subsidiar intervenções de regularização fundiária de forma equânime.

Diante desse cenário de mapeamentos e caracterizações divergentes conforme o órgão que os produz, o que dificulta a implementação de políticas públicas nesses territórios, a pesquisa "Cartografia em conflito: identificação, mapeamento e caracterização dos assentamentos informais e das práticas de planejamento popular" propõe-se a identificar, mapear e caracterizar os assentamentos informais de Natal, a partir de seus atributos. Este resumo apresenta a produção acumulada em um ano de pesquisa, organizada em três produções: a construção de uma base cartográfica georreferenciada e de fichas de caracterização para uma amostra de favelas nas quatro Regiões Administrativas, que já resultou em novas delimitações territoriais e na identificação de assentamentos ainda não reconhecidos pelas bases oficiais; a sistematização desse conhecimento em um artigo-resumo submetido ao V Seminário Internacional de Urbanização de Favelas (V UrbFavelas); e o uso direto desses dados como insumo para a disciplina de Tópicos Especiais em Projeto Urbano e Territorial 03 (Ateliê de Favelas, ARQ6953), na qual discentes de graduação desenvolvem planos e projetos de urbanização para quatro favelas natalenses, uma por região, também destinados a compor a mostra do V UrbFavelas. O resultado, portanto, não é apenas acadêmico, mas também contribui para preencher a lacuna de dados sobre a informalidade habitacional na cidade e para subsidiar futuras estratégias de política urbana e habitacional, sustentando planos de urbanização de favelas.

Metodologia

A metodologia combina uma etapa quantitativa e documental com uma etapa qualitativa de caracterização territorial, estruturada em três frentes complementares. A primeira frente consiste em levantamento bibliográfico, documental e cartográfico: investigação em sites institucionais, referências acadêmicas e documentos municipais e federais sobre os assentamentos informais de Natal, reunindo dados diversos entre o IBGE, a Prefeitura Municipal de Natal, a Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB) e o MapBiomas. Esses dados alimentam uma base cartográfica (figura 01) estruturada no sistema de Coordenadas Métricas Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 25 Sul, construída e manipulada na ferramenta de geoprocessamento QGIS, cujo uso constitui também uma habilidade metodológica desenvolvida ao longo do plano de trabalho.

A segunda frente é a seleção e delimitação da amostra. Os assentamentos foram organizados por Região Administrativa, buscando diversidade tanto na inserção urbana quanto na morfologia, de modo a contemplar a heterogeneidade de tipos presentes na cidade: ocupações ribeirinhas e de mangue (a exemplo Passo da Pátria e Mosquito), ocupações de encostas e dunas litorâneas (Rua do Motor, Vila de Ponta Negra e África) e ocupações associadas à malha viária ou a linha férrea (Rua da Palha e Gramorezinho), além de loteamentos irregulares originados de conjuntos habitacionais, como Cidade Praia. Os limites de cada assentamento identificados em campo são comparados aos polígonos oficiais

do IBGE e as AEIS do PDN (Plano Diretor de Natal,2022), evidenciando divergências entre os conjuntos de dados.

A terceira frente é a efetivação de 3 produtos derivados, o primeiro sendo a elaboração de Fichas de Caracterização de Assentamentos Populares (figuras 02 e 03) para cada comunidade da amostra. As fichas adotam como referencial metodológico principal o Guia para o Mapeamento e Caracterização de Assentamentos Precários (Ministério das Cidades, 2010), do qual são extraídas as variáveis tipológicas de análise: acesso à moradia, características do terreno e do parcelamento, localização e inserção na periferia urbana, traçado viário, infraestrutura urbana, condição da unidade habitacional e classificação predominante do assentamento. A esse referencial soma-se para apoio teórico o Plano Local de Habitação de Interesse Social de Natal (PLHIS, 2013), utilizado para contextualizar cada território no diagnóstico habitacional municipal, e teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso sobre assentamentos específico, que fornecem dados históricos e de regularização fundiária pouco presentes nas bases oficiais.

Complementarmente, cada ficha reúne um conjunto de variáveis espacializadas e sobrepostas na base cartográfica: domicílios do CNEFE (Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos), delimitação e domicílios do IBGE, renda domiciliar, histórico de ocupação, edificações, parcelamento do solo, traçado viário, infraestrutura (redes de esgoto, abastecimento de água e drenagem), topografia, zoneamento (incluindo ZPA, AEIS e AEITP), condicionantes ambientais (formação florestal, mangue, campo alagado, restinga, praia e duna) e situações de risco (contaminação de água e solo, alagamento, inundação, erosão e rastejo/deslizamento, classificados por grau de intensidade).

O segundo produto é a sistematização do trabalho em um artigo-resumo submetido ao V Seminário Internacional de Urbanização de Favelas (V UrbFavelas 2026), seguindo um eixo de análise mais enviesado pelos condicionantes ambientais e características morfológicas e topográficas (figura 04) . O terceiro produto se deriva do repasse direto dos dados e mapeamentos produzidos para a disciplina de Tópicos Especiais em Projeto Urbano e Territorial 03 cuja ementa propõe o desenvolvimento de propostas teóricas e projetuais em formato de plano urbanização e/ou melhoria habitacional para quatro favelas de Natal, uma em cada Região Administrativa. Os dados de delimitação, caracterização morfológica, ambiental e de infraestrutura produzidos pela pesquisa constituem a base empírica sobre a qual a turma construiu seu levantamento antes de avançar para a etapa de plano e de projeto (figura 06), cujos resultados também serão expostos no V UrbFavelas.

O cruzamento dessas três frentes metodológicas constitui a produção referente a pesquisa no período de um ano, com prospecção para abranger todas as favelas de Natal nessa metodologia de análise e propagação dessas informações em veículos digitais, democratizando o acesso aos mapeamentos e dados levantados sobre os assentamentos precários da capital potiguar.

Resultados e Discussões

O primeiro resultado é reflexo do próprio objetivo da pesquisa, demostrar que a consolidação de dados e sua comparação que derivam um produto mais preciso na análise dos assentamentos informais. Ao comparar sistematicamente as delimitações do IBGE com as identificadas em campo em comunidades como Passo da Pátria, Gramorezinho, Vila de Ponta Negra e Mosquito, a pesquisa não apenas ajustou delimitações, mas demonstrou que territórios informais precisam de uma análise minuciosa e local, com apoio comunitário, para seu reconhecimento. O caso de Cidade Praia (figuras 02 e 03) é ilustrativo: originada dentro dos limites de um conjunto habitacional formal financiado pela Caixa Econômica Federal (GOMES,2022) e expandida por loteamento irregular consolidado desde 1993, a comunidade tem AEIS demarcada desde 1994, mas não aparece delimitada nas bases censitárias mais recentes.

Essas discrepâncias expressam metodologias com finalidades distintas: o IBGE opera com critérios de estudo censitário nacional, enquanto a delimitação da pesquisa agrega dados do Plano Diretor de Natal (PDN) e do PLHIS aliados a um estudo dedicado do traçado urbano, dos níveis de adensamento, da precariedade e do histórico de ocupação de cada território. Definir esses limites em nível local surge, portanto, como aspecto prioritário para o entendimento do território favelístico e de suas necessidades, sobretudo porque os limites administrativos condicionam diretamente o acesso a programas de regularização e urbanização.

Apesar da heterogeneidade observada entre os assentamentos informais de Natal, distribuídos pelas quatro Regiões Administrativas, é possível reconhecer a recorrência de determinados padrões de inserção territorial, sistematizados como produto para o artigo-resumo do UrbFavelas.

Um primeiro padrão reúne assentamentos como Japão/Novo Horizonte, Passo da Pátria e Mosquito, cuja organização espacial se estrutura a partir de um eixo fluvial ou de mangue; os dois últimos casos são singulares por também serem margeados por linha férrea. As origens desses núcleos estão associadas à ocupação de margens de rios, encostas ou zonas alagáveis, e o conjunto compartilha riscos de alagamento e inundação, tornando-se vulnerável à erosão quando associado à elevada concentração habitacional sobre solo arenoso, como ocorre em Japão/Novo Horizonte.

Um segundo padrão reúne assentamentos originados pela ocupação de encostas e dunas litorâneas, a exemplo de Rua do Motor/Escadaria, Vila de Ponta Negra e África. Nesses casos, o relevo acidentado e o solo arenoso influenciam diretamente o traçado urbano, predominantemente irregular e adaptado à topografia. Os quadros-resumo revelam trechos submetidos a elevado risco de erosão em razão da ocupação consolidada sobre relevos dunares, resultando em vulnerabilidade significativa do solo e das edificações.

Um terceiro padrão reúne assentamentos cuja paisagem urbana e inserção territorial são marcadas pela relação estreita com a malha viária estruturante, como a Comunidade Palha e Gramorezinho. Apesar da semelhança de

ocupação contígua às vias, essas comunidades apresentam particularidades no parcelamento do solo: um parcelamento informal, adensado e ortogonal, lindeiro a via de baixo fluxo (Comunidade Palha), frente a um parcelamento descontínuo e esparso, às margens de eixo rodoviário estruturante (Gramorezinho).

Um quarto padrão, evidenciado pela ficha de Cidade Praia (figuras 02 e 03), corresponde a loteamentos irregulares originados dentro dos limites de conjuntos habitacionais formais. O território de Cidade Praia originou-se em quatro quadras de um conjunto habitacional financiado pela Caixa Econômica Federal e se expandiu, majoritariamente, por loteamentos irregulares com lotes entre 100 e 300 m², comercializados de forma informal e sem registro imobiliário. A comunidade se localiza no bairro de Lagoa Azul (Zona Norte), área de periferia reconhecida pelo município em 1993, com AEIS demarcada apenas em 1994; A única intervenção pública de urbanização registrada foi a pavimentação das vias em 2020, hoje sem manutenção. Parte da ocupação incide ainda sobre a antiga faixa de domínio ferroviário, o que não configura invasão intencional de área pública, mas decorre do próprio processo de parcelamento irregular que não informava aos compradores as restrições legais do terreno

A continuidade da geração de fichas para as demais favelas de Natal são impulsionadas pela sistematização e identificação desses padrões, e por vezes a própria despadronização dos mesmos, evidenciando a singularidade de cada assentamento informal frente á seus conflitos e sua história.

Parte da produção deste ano de pesquisa foi diretamente convertida em um artigo-resumo submetido ao V Seminário Internacional de Urbanização de Favelas, evento que reúne pesquisadores de todo o país em torno da urbanização de favelas. Esse artigo apresenta uma parcial da amostra de assentamentos caracterizados pela pesquisa, focando no comparativo (figura 04) entre delimitações oficiais e de campo e no quadro-síntese (figura 05) das variáveis geomorfológicas, ambientais e morfológicas. Sua metodologia segue em apresentar apenas dois dos fatores de análise para as favelas, mas já demonstrado o grau de complexidade e singularidade de cada uma, e como cada atributo constrói uma camada a mais de entendimento sobre aquele território.

Um resultado que diferencia a produção acadêmica da pesquisa, mas que demonstra seu auxílio direto para com projetos de urbanização e melhoria das favelas, através da disciplina de Tópicos Especiais em Projeto Urbano e Territorial 03 (Ateliê de Favelas), oferecida no período 2026.1 pelo Departamento de Arquitetura. A disciplina propõe que discentes desenvolvam propostas de plano e projeto de urbanização e/ou melhoria habitacional para quatro favelas de Natal, uma por Região Administrativa, com resultados destinados a compor uma mostra durante o próprio V UrbFavelas. Com os mapeamentos, delimitações e fichas de caracterização já produzidos pela pesquisa, os discentes puderam analisar o território (figura 06) de intervenção com muita mais facilidade, e desenvolver propostas de plano e projeto com maior entendimento da favela.

Conclusão

A produção acumulada ao longo de um ano de pesquisa confirma que os assentamentos informais de Natal formam um conjunto territorialmente diverso, cuja compreensão exige a articulação entre referenciais nacionais de mapeamento e caracterização (Guia MCidades), diagnósticos municipais (PLHIS, PDN) e conhecimento produzido localmente por meio de teses, trabalhos de conclusão de curso e vistorias de campo. A construção de fichas de caracterização individualizadas, como a de Cidade Praia, demonstrou-se um instrumento eficaz para sistematizar, de forma comparável, atributos de acesso à moradia, parcelamento, infraestrutura, condição habitacional, topografia, zoneamento, aspectos ambientais e situações de risco, revelando tanto especificidades quanto padrões recorrentes entre territórios distintos.

As divergências identificadas entre as delimitações do IBGE e as delimitações produzidas pela pesquisa reforçam a hipótese inicial do projeto: os dados agregados, embora relevantes para o diagnóstico nacional, não conseguem captar isoladamente a diversidade morfológica, geomorfológica e físico-territorial dos assentamentos de Natal, tampouco os conflitos fundiários específicos de cada comunidade, como o observado na faixa ferroviária de Cidade Praia. Essa lacuna, já apontada pela desatualização dos instrumentos municipais desde 1994, reforça a necessidade de produção contínua de dados locais como reforço direto às políticas de regularização fundiária e urbanização. Portanto, destaca-se a relevância do apoio da UFRN e do PIBIC/CNPq para a viabilização deste estudo e para o fortalecimento de realidades locais e conferir protagonismo técnico e social às demandas dessas comunidades.

Como próximos passos, a pesquisa deve ampliar a amostra de assentamentos caracterizados, consolidando a base cartográfica georreferenciada como ferramenta de apoio a planos de urbanização de favelas e democratização de dados urbanos de interesse social, além de aprofundar a análise comparativa entre tipologias para subsidiar critérios locais de priorização de intervenções, à semelhança dos critérios propostos pelo Guia MCidades. Espera-se, assim, contribuir tanto para o avanço acadêmico dos estudos sobre assentamentos informais em Natal quanto para instrumentalizar políticas públicas de urbanização e melhoria mais sensíveis às especificidades de cada território favelístico da cidade.

Referências

ATAÍDE, Ruth Maria da Costa. Interés ambiental frente a interés social: la gestión de los conflictos socio-espaciales en los espacios naturales protegidos: los retos de la regularización urbanística de los asentamientos informales en Natal, RN, Brasil. 2013. 607 f. Tese (Doutorado em Pensamiento geográfico y organización del territorio) – Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Barcelona, Barcelona, 2013.

BENTES SOBRINHA, Maria Dulce Picanço. Aplicação de novos instrumentos urbanísticos no município de Natal. In: ROLNIK, Raquel; CYMBALISTA, Renato (org.). Instrumentos urbanísticos contra a exclusão social. São Paulo: Instituto Pólis, 1997. p. 73-84. (Publicações Pólis, n. 29).

DUARTE, Marise Costa de Souza. Espaços especiais urbanos: desafios à efetivação dos direitos ao meio ambiente e à moradia. Rio de Janeiro: Observatório das Metrópoles, 2011.

FERREIRA, Ângela Lúcia de Araújo. Urbanismo e desenvolvimento socioespacial de Natal (1900-1996). 1996. Tese (Doutorado) – Universidad de Barcelona, Barcelona, 1996.

GOMES, Maria Cecília de Souza. Cidade Praia: plano popular preliminar de urbanização em Lagoa Azul, Natal/RN. 2022. 212 f. Trabalho Final de Graduação (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Arquitetura, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

LINHARES, Igor dos Santos. Entre o mar e o mercado: diretrizes para o plano de regulamentação da AEIS de Brasília Teimosa e Vietnã. 2024. 311 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

MARICATO, Ermínia. Metrópole na periferia do capitalismo: ilegalidade, desigualdade e violência. São Paulo, 1995.

MARICATO, Ermínia. Brasil, cidades: alternativas para a crise urbana. Petrópolis: Vozes, 2001.

MARICATO, Ermínia. Brasil 2000: qual planejamento urbano? Cadernos IPPUR, Rio de Janeiro, ano 11, n. 1-2, p. 113-130, 1997.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Habitação. Guia para o mapeamento e caracterização de assentamentos precários. Brasília: Ministério das Cidades, 2010. 82 p.

OLIVEIRA, Fabrício et al. Planejamento popular em contexto de conflito: panorama da experiência brasileira. In: ANAIS DO XXI ENANPUR. Curitiba, 2025.

OLIVEIRA, Francisco de. Crítica da razão dualista. São Paulo: Boitempo, 2003.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. Secretaria Municipal de Planejamento. Instituto de Planejamento Urbano de Natal. Relatório de situação das favelas de Natal. Natal, 1987.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. Plano local de habitação de interesse social: etapa 02 – diagnóstico do setor habitacional. Natal: IDESPLAN, 2013.

ROLNIK, Raquel. A cidade e a lei: legislação, política urbana e territórios na cidade de São Paulo. 2. ed. São Paulo: FAPESP/Studio Nobel, 1999.

SECRETARIA MUNICIPAL DE TRABALHO E ASSISTÊNCIA SOCIAL. Unidade Executora Municipal. Plano Estratégico Municipal para Assentamentos Subnormais – PEMAS. Natal, 2001.

SOARES, Bernardo Nascimento; CADÓ, Júlia Cláudia de Araújo; OLIVEIRA, Daniel Victor Fernandes. Entre casebres, cabanas e choupanas: vestígios e indícios da origem da favelização em Natal (RN), 1890-1930. In: ANAIS DO 18º SEMINÁRIO NACIONAL DE HISTÓRIA DA CIDADE E DO URBANISMO (SHCU). Natal, 2024.

SOARES, Bernardo Nascimento; SOUZA, Iago Felipe; CADÓ, Júlia Cláudia de Araújo. Imprecisões cartográficas: favelas de Natal/RN. In: ANAIS DO IV URBFAVELAS. São Paulo, 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE (UFRN). Política de habitação de interesse social para o município de Natal. Produto 1. Relatório do diagnóstico da situação habitacional do município de Natal. Natal: Funpec, 2004.

Anexos



Figura 2 — Ficha de Caracterização de Assentamentos Populares: Cidade Praia (ortofoto e variáveis tipológicas).



Figura 1 — Imagem do software QGIS com a base cartográfica.



Figura 3 — Ficha de Caracterização de Assentamentos Populares: Cidade Praia (mapas temáticos).



Figura 4 — Quadro comparativo entre delimitação do IBGE e delimitação da pesquisa.



Figura 5 — Quadro-síntese da análise geomorfológica, ambiental e morfológica da amostra.



Figura 6 – Mapa Síntese da Comunidade África Produzido na Turma Atelier de Favelas

CÓDIGO: HS1741

AUTOR: JESSIKA BEATRIZ FIRMINO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: ANGELA LUCIA DE ARAUJO FERREIRA

TÍTULO: Espaços cênicos: a influência da implantação dos teatros na construção de centralidades na malha urbana de Natal, Rio Grande do Norte.

Resumo

Diante das transformações sociais, econômicas e urbanas ocorridas na cidade de Natal, RN desde o início do século XX, os espaços teatrais podem revelar distintas formas de viver e experimentar a cidade, influenciar-se mutuamente e registrar determinados modos de vida de diferentes períodos da sociedade. “Os lugares de performance geram significados sociais e culturais próprios que, por sua vez, ajudam a estruturar o significado de toda a experiência teatral” (Carlson, 1989). A partir dessa perspectiva, este estudo busca analisar a influência da da localização, temporalidades e público dos teatros Alberto Maranhão e Riachuelo na construção de espaços capazes de criar diferentes formas de sociabilidade, apropriação e experiência da cidade. A metodologia fundamenta-se em leituras e fichamentos orientados por uma perspectiva fenomenológica, compreendendo que os espaços teatrais estão intrinsecamente relacionados às dinâmicas socioeconômicas nas quais se inserem. A análise dos teatros Alberto Maranhão e Riachuelo revela que suas influências perpassam o âmbito artístico e de sociabilidade e permeiam a construção das centralidades da cidade de Natal, atuando, em distintos momentos, como fatores atrativos e representativos de determinados grupos sociais, considerando suas distintas localizações, temporalidades e relações com os públicos que os frequentam.

Palavras-chave: Alberto Maranhão. Apropriação do espaço urbano. Teatro Riachuelo.

TITLE: Scenic spaces: the influence of theater location on the construction of centralities in the urban grid of Natal, Rio Grande do Norte

Abstract

In the light of the social, economic, and urban transformations that have taken place in the city of Natal, RN, since the beginning of the 20th century, theatrical spaces can

reveal distinct ways of living and experiencing the city, influencing one another and recording specific lifestyles from different periods of society. "Performance places generate their own social and cultural meanings which, in turn, help structure the meaning of the entire theatrical experience" (Carlson, 1989). From this perspective, this study seeks to analyze the influence of the location, temporalities, and audiences of the Alberto Maranhão and Riachuelo theaters on the construction of spaces capable of creating different forms of sociability, appropriation, and urban experience. The methodology is grounded in readings and literature reviews guided by a phenomenological perspective, understanding that theatrical spaces are intrinsically linked to the socioeconomic dynamics in which they are embedded. The analysis of the Alberto Maranhão and Riachuelo theaters reveals that their influence extends beyond the artistic and social realms, shaping the construction of Natal's urban centralities. At different moments, they have acted as attractive elements representing specific social groups, considering their distinct locations, temporalities, and relationships with the audiences who attend them.

Keywords: Alberto Maranhão. Appropriation of urban space. Teatro Riachuelo.

Introdução

A cidade de Natal apresenta, ao longo de sua formação, diferentes configurações de centralidade e formas de apropriação do espaço urbano, acompanhadas por transformações nas práticas sociais, culturais e nos modos de vida de sua população. Nesse processo, os espaços destinados às práticas teatrais inserem-se em contextos urbanos distintos, estabelecendo relações particulares com seus públicos, com o entorno e com as dinâmicas de cada período. Infere-se por um lado que as diferentes configurações e inserções urbanas dos teatros Alberto Maranhão e Riachuelo expressam as transformações nas formas de sociabilidade e nos modos de viver a cidade de Natal, por outro lado esses espaços constituem registros das diferentes centralidades de sua formação urbana.

A partir dessa problemática, a intenção deste artigo é analisar os espaços teatrais de Natal para além de sua função como equipamentos de representação artística, buscando compreender de que maneira sua localização e formas de apropriação se relacionam com as transformações sociais, econômicas e urbanas da cidade. O trabalho vincula-se aos estudos da arquitetura teatral e à compreensão fenomenológica do espaço, articulando a experiência do usuário às transformações sociais e urbanas que constituem a cidade. Parte-se, assim, do entendimento de que o teatro não se restringe ao espaço destinado à realização do espetáculo, mas estabelece relações com o contexto no qual está inserido e participa da construção dos significados atribuídos ao lugar.

Essa compreensão permite deslocar a análise do edifício teatral enquanto objeto isolado para sua relação com a cidade e com as práticas sociais que nele e ao seu redor se desenvolvem. Dessa forma, a arquitetura, a localização e as formas de apropriação dos teatros são consideradas elementos capazes de revelar diferentes experiências urbanas e modos de sociabilidade.

Assim, a percepção de que esses espaços estão sempre vinculados a uma dinâmica socioeconômica, em que cada teatro consegue exprimir, por meio de sua arquitetura e

sua localidade, qual público ele atende, anexando, portanto, um status social a esses espaços e transformando a experiência do usuário, dependendo de qual poder aquisitivo ele tenha. Desse modo, a pesquisa resulta no abastecimento e manutenção do Atlas Teatral, uma parceria do Grupo de Pesquisa História da Cidade do Território e do Patrimônio (HCUrb) do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e do Observatório dos Espacios Escénicos ligado à Universitat Politècnica de Catalunya.

A partir do reconhecimento de que o teatro constitui uma importante expressão artística que acompanha a sociedade e suas transformações ao longo dos séculos, observa-se que as relações presentes nesse ambiente não se restringem apenas ao campo das performances artísticas. Esses espaços revelam-se moldadores de padrões sociais de diferentes períodos históricos, como locais de encontro que exprimiam a personificação dos modos de viver das sociedades, expondo aspectos das inter-relações humanas e sociais. Sob essa ótica, torna-se notório que a forma de apropriar-se do espaço urbano revela nuances que refletem essas atividades de distintos corpos sociais em uma mesma cidade ao longo dos anos.

A seguir, será apresentada a metodologia da pesquisa, detalhando os procedimentos adotados para a construção e análise dos dados, seguida da discussão dos resultados à luz do referencial teórico utilizado.

Metodologia

A metodologia utilizada desenvolveu-se por meio de procedimentos de caráter operacional-analítico, articulando revisão bibliográfica, pesquisa documental e observação direta dos espaços teatrais. O referencial teórico foi constituído por autores que discutem as relações entre arquitetura, experiência espacial, espaço teatral e cidade, tendo como principal arcabouço para a compreensão dos lugares de performance a obra Places of Performance: The Semiotics of Theatre Architecture, de Marvin Carlson (1989). Também foram incorporadas as contribuições de Merleau-Ponty (2011), Shirazi (2014), Pallasmaa (2012), Leatherbarrow (2004; 2008), e Rolnik (2012), utilizadas para fundamentar a compreensão do espaço como experiência vivida e como elemento relacionado às dinâmicas sociais e urbanas.

Em um primeiro momento, foram realizados levantamentos bibliográficos e fichamentos dos textos selecionados, buscando identificar conceitos relacionados à experiência fenomenológica do espaço, à arquitetura teatral, aos lugares de performance, à apropriação e às relações entre arquitetura e contexto urbano. Esses conceitos constituíram as categorias orientadoras da análise dos teatros, permitindo estabelecer relações entre as discussões teóricas e as características observadas nos espaços estudados.

A pesquisa documental foi desenvolvida paralelamente à revisão bibliográfica, por meio do levantamento de informações históricas, arquitetônicas e urbanas em sites institucionais, jornais, publicações e registros relacionados aos teatros Alberto Maranhão e Riachuelo. Esses materiais foram utilizados para compreender os contextos

de implantação dos edifícios, suas transformações ao longo do tempo, suas relações com as centralidades urbanas e os diferentes públicos e práticas sociais associados a cada equipamento. Dessa forma, a documentação não foi utilizada apenas para a obtenção de dados históricos, mas também como suporte para interpretar a relação entre os teatros e os processos de transformação da cidade de Natal.

A etapa de observação direta foi orientada por uma perspectiva fenomenológica, considerando a experiência do espaço a partir da percepção corporal, dos percursos, das transições entre ambientes, das relações de escala, materialidade, iluminação, sonoridade, circulação e apropriação. No Teatro Alberto Maranhão, a análise foi também construída a partir da experiência recorrente da pesquisadora como frequentadora do espaço, permitindo observar diferentes momentos de aproximação e permanência no edifício. O percurso até a sala de espetáculo é compreendido como uma sequência de camadas espaciais: a chegada pela Praça Augusto Severo, a espera junto à bilheteria, a passagem para a área interna aberta, o hall ou foyer, o pátio e, posteriormente, a entrada na sala teatral. Essa sequência evidencia uma transição gradual entre o espaço urbano e o espaço da performance, na qual o corpo é progressivamente conduzido por diferentes ambientes até alcançar a experiência do espetáculo. Essa experiência também foi analisada a partir da relação do teatro com o espaço urbano exterior. Sua inserção na Praça Augusto Severo, a relação com as ruas e acessos e a presença de diferentes formas de apropriação do entorno, como atividades comerciais e a permanência de moradores em situação de ruas, foram consideradas elementos que participam da experiência (experienciação) do lugar.

No Teatro Riachuelo, inserido no Midway Mall, a observação concentrou-se principalmente no percurso realizado pelo espectador desde o espaço de circulação do shopping até a entrada no teatro. Foram considerados o circuito de compras e serviços, as diferentes circulações entre os pavimentos e a relação entre o teatro e as demais atividades do empreendimento. A experiência evidenciou uma sequência espacial distinta daquela observada no Alberto Maranhão, na qual o acesso ao teatro é mediado por uma estrutura predominantemente voltada ao consumo e à circulação. Nesse percurso, a presença de lojas, restaurantes e outros serviços interfere na experiência de aproximação do espectador com o espaço teatral, fazendo com que o equipamento seja percebido como parte de um conjunto mais amplo de lazer e consumo.

A comparação entre os dois espaços foi realizada a partir dessas experiências de percurso e apropriação, considerando como cada arquitetura orienta o corpo e estabelece diferentes relações entre exterior e interior, circulação e permanência, cidade e equipamento cultural. Essas diferenças foram utilizadas como elementos de interpretação das distintas formas de sociabilidade e experiência urbana associadas aos dois teatros. A metodologia, portanto, não se limitou à descrição formal dos edifícios, mas procurou articular a experiência vivida dos espaços às suas condições históricas, urbanas e sociais, permitindo analisá-los como registros materiais de diferentes formas de apropriação, sociabilidade e vivência da cidade.

Resultados e Discussões

Com base nos fichamentos feitos e nas reportagens analisadas torna-se notório, em primeiro plano, uma mudança na centralidade teatral de Natal. Nesse ponto surge o destaque dos teatros Alberto Maranhão (figura 04) e Riachuelo (figura 14) como expressões da sociedade potiguar em determinados períodos de sua história.

Primeiramente, surge, no final do século XIX, o Teatro Alberto Maranhão (TAM), pensado para atender a camadas da elite e refletindo o momento de Belle Époque que a cidade de Natal estava vivenciando. Sua implantação se dá em uma área recém-saneada no bairro da Ribeira (figura 02 e figura 03), inserindo-se em uma localidade de centralidade urbana. Entretanto, mais do que uma simples escolha de locação, sua presença nesse espaço expressa um modo de viver socialmente ativo e apropriador dos espaços coletivos, bem como representa o projeto de uma nova centralidade emergente. A importância do teatro para a sociedade potiguar desse período era não só de consumo da arte, mas também de uma espetacularização da vida, em que a ida ao teatro constituía uma distinção social, na medida em que pertencer a esses espaços representava um status social de poder aquisitivo elevado. Nesse sentido, o Teatro Alberto Maranhão funcionava como um espaço de sociabilidade e reconhecimento, no qual a própria existência do teatro contribuía não só com a consolidação desse projeto de centralidade, mas também com a afirmação de uma posição social elevada na sociedade natalense.

A concentração de atividades urbanas e infraestrutura favoreceu, então, a localização do teatro na Ribeira. A decisão se dá pela possibilidade de o teatro não ser um equipamento cultural isolado, mas parte de uma rede de atividades que reforçam a importância dessa área da cidade como centro de referência da vida urbana. Nesse sentido, a presença do TAM deve ser entendida não como um elemento responsável isoladamente pela expansão da cidade, mas como parte de um conjunto de equipamentos desse projeto de centralidades emergentes que consolidaram a Ribeira e a Cidade Alta como localidades importantes do município de Natal.

Essa relação torna-se ainda mais significativa quando observada por meio de processos posteriores de crescimento da cidade. A consolidação desses bairros como áreas centrais de serviços, atividades de cultura e circulação de pessoas fez com que o eixo entre esses dois espaços assumisse um papel estruturador na dinâmica urbana durante determinado período do século XIX. Assim, o Alberto Maranhão, inserido nesse contexto, passou a integrar essa centralidade tornando-se um importante marco desse período principalmente por sua representatividade de práticas culturais e de sociabilidade. Portanto, o TAM se consolida então, como, simultaneamente, um registro de centralidade de uma época da cidade, mas também como um marco a partir do qual pode ser observada e analisada a transformação dos eixos de crescimento e apropriação da urbis. Sua presença na Ribeira evidencia a relação entre arquitetura, centralidade e práticas sociais.

Com o avanço da urbanização e a posterior expansão da cidade para outras áreas, as centralidades também passaram por processos de deslocamento e transformação. A importância inicialmente concentrada na Ribeira e na Cidade Alta foi gradualmente acompanhada pela emergência de novos eixos e áreas de interesse urbano (figura 01), modificando as relações de circulação, consumo, lazer e sociabilidade. E assim, em outro momento, mais de um século mais tarde, surge o Teatro Riachuelo, esse fruto de uma sociedade contemporânea e com hábitos totalmente distintos. Entretanto, da mesma forma que o Alberto Maranhão, o reflexo da escolha de sua implantação no maior

shopping da cidade, o Midway Mall, é também uma projeção da sociedade potiguar na qual ele se insere. Para compreender de fato a relação da representatividade social do Riachuelo é necessária, antes, a compreensão da hierarquização do shopping Midway Mall (figura 12).

Como compreensão do âmbito da sociologia, entende-se cada piso do shopping como espaços que materializam diferentes níveis de poder aquisitivo, consumo e distinção social (figura 13). Cada andar obedece a uma setorização de renda e poder aquisitivo, onde o L1 (primeiro piso), por estar mais próximo das entradas centrais do edifício que abrigam equipamentos como paradas de ônibus, é considerado o local com maior quantidade de lojas populares e de preços acessíveis. Por outro lado, o L3 (terceiro piso) expressa o total oposto com uma quantidade maior de lojas e serviços exclusivos, incluindo acesso ao Teatro Riachuelo. O shopping assume, portanto, a forma de uma cidade vertical, na qual quanto mais andares se sobe mais restritos ficam os ambientes. O mecanismo de controle espacial é sutil, mas notório em qualquer análise espacial, onde a arquitetura transforma uma diferença econômica abstrata em uma experiência espacial concreta.

A relação entre esses dois espaços acentua a percepção da mudança da centralidade da cidade do eixo da Ribeira, representada pelo Alberto Maranhão, para o eixo sul, representado pelo Riachuelo, mas, não apenas isso, como também como essas mudanças são parte do reflexo das dinâmicas da sociedade natalense. O deslocamento desse vetor de expansão é resultado dos novos hábitos urbanos, com o circuito do shopping incluso na experiência de ida ao teatro e na oferta de diversos serviços ao mesmo tempo. Não se pode afirmar que a experiência teatral deixou de expressar um status de poder social; pelo contrário, ambos os teatros e ambas as faces da mesma sociedade são o reflexo das elites potiguares. Entretanto, a mudança observada está exatamente na experiência fenomenológica, que alterou-se ao longo do tempo, onde a cidade real se isola da experiência teatral.

Ao partir dessa percepção do teatro de shopping como uma nova forma de experienciar o espaço cênico, fica claro que este é um espaço efetivamente multiuso, que atende a várias vertentes, não só culturais e artísticas, mas também como uma forma de tradução da nova linguagem desses teatros (Monteiro; Lopes, 2010). Então, a discussão sobre a mudança da experiência fenomenológica do espectador não só como consumidor da arte, mas principalmente como cidadão e parte dessa sociedade potiguar torna-se cada vez mais latente e aponta para a capacidade simbólica desses espaços de representar uma sociedade diferente daquela do século XIX. Mesmo estando em uma mesma cidade e ambos sendo teatros de elite, a mudança dos recortes temporais amplia a pesquisa e aponta novos significados as conclusões acerca da influência dos teatros nas dinâmicas de sociabilidade.

Nessa perspectiva, a experiência do espectador do teatro de shopping se inicia bem antes de sua entrada no teatro propriamente dito. O percurso dentro do shopping é mediado por corredores de lojas, praças de alimentação e oferta de diversos serviços, fazendo com que a experiência cultural esteja inserida em uma sequência de estímulos visuais, sonoros, sensoriais e até mesmo de práticas de consumo. O espectador não acessa o teatro a partir da rua, mas passa, antes, por uma série de espaços controlados que orientam seu deslocamento e condicionam sua percepção do entorno (figura 16). Assim, a cidade deixa de ser parte vivida dessa ida ao teatro e o shopping assume um

papel moldador do percurso teatral. A experiência do espetáculo, portanto, não se restringe apenas ao que acontece no palco, mas compreende também o percurso, sensações e relações espaciais que antecedem o espaço cênico. A arquitetura assume o papel de guiar o espectador por diferentes atmosferas que se modificam a cada condição espacial diferente que ele experimenta.

Em contrapartida, graças a ligação direta com a rua, a experiência no Alberto Maranhão se inicia antes mesmo de sua entrada no edifício. Diferenciando-se do Riachuelo, cuja experimentação é mediada pelos corredores do shopping, o TAM estabelece uma relação bem mais direta com a apropriação do espaço público da cidade. Localizado na Praça Augusto Severo, o teatro participa visualmente da experiência urbana não apenas de quem vai até ele, mas também de qualquer cidadão que caminhe pelo bairro da Ribeira.

Entretanto, sua experiência fenomenológica não se restringe só a sua relação direta com a rua, mas também pelas mudanças arquitetônicas que o teatro experienciou ao longo dos anos. Inaugurado em 1904, como Teatro Carlos Gomes, o prédio possuía uma configuração bem mais simples associada ao neoclassicismo. A transformação posterior promovida na década seguinte à sua inauguração alterou significativamente a percepção do ambiente edificado do teatro. Recebendo uma nova composição, com elementos Art Nouveau, o teatro se consolida como um monumento da cidade atrelado a Praça Augusto Severo e como parte importante dela (figura 05).

Desse modo, pode ser estabelecida uma relação contrastante entre a experiência teatral do Teatro Alberto Maranhão e do Teatro Riachuelo. No shopping o espectador aproxima-se dos espaços cênicos por meio de uma sequência espacial guiada, diferenciando-se da experiência de vivenciar a rua. A diferença não está apenas no edifício teatral, mas naquilo que o antecede, no caminho até ele. Essa distinção é importante para a análise da relevância desses teatros na construção da sociabilidade e experimentação da cidade de Natal, revelando que existem diversas maneiras de experimentar uma mesma cidade.

Com base nas discussões proporcionadas pelos estudos dos teatros e sua malha de influência na cidade, a principal afirmação e ideia central pode ser construída a partir de como esses espaços atuam não apenas como equipamentos culturais, mas como registros materiais das formas de viver e se relacionar com a cidade. A diferença entre eles não está apenas em suas distintas características arquitetônicas, mas nas relações estabelecidas com as centralidades, os eixos de expansão e as práticas sociais que as circundam. Nesse sentido, os teatros Alberto Maranhão e Riachuelo não precisam ser somente entendidos como representantes de duas sociedades distintas, mas como marcos de diferentes momentos da sociedade de uma mesma cidade.

Essas transformações ampliam o olhar arquitetônico de que as mudanças de uma cidade não ocorrem apenas em sua dimensão física, mas principalmente em suas dimensões simbólicas e sociais. O papel da arquitetura é exatamente esse: expressar fisicamente a história e mudança das cidades como documento. Os teatros, então, concretizam-se como instrumento de leitura e compreensão dessa dimensão figurativa da urbis (Raquel Rolnik, 1988) Ambos os teatros não são necessariamente representações isoladas de uma sociedade fragmentada, mas diferentes expressões sociais que coexistem, se sobrepõem e se transformam dentro de uma mesma cidade em cenários e momentos

distintos. Sua importância está justamente em evidenciar que as transformações urbanas não se dão de forma homogênea para os diferentes grupos sociais de uma mesma cidade (Merleau-Ponty, 2011).

Conclusão

Os espaços teatrais, para além de sua função de abrigar manifestações artísticas, constituem lugares nos quais se materializam relações entre sociedade e cidade, tornando perceptíveis diferentes formas de experienciação do espaço urbano. Nesse sentido, a arquitetura cênica acompanha as transformações dos modos de viver o espaço urbano, uma vez que sua implantação e relação com o entorno estão vinculadas às dinâmicas sociais e econômicas de diferentes períodos.

No contexto do RN, essa relação evidencia-se na trajetória dos espaços teatrais e em sua inserção nos processos de transformação urbana do estado. Esses equipamentos não apenas acompanham as mudanças da sociedade potiguar, mas também constituem registros materiais de diferentes momentos históricos. Em Natal, essas transformações tornam-se perceptíveis a partir da relação entre os teatros analisados. A comparação entre seus contextos de implantação evidencia a passagem entre distintas formas de experimentar o espaço urbano, revelando mudanças nos percursos e nas relações estabelecidas entre os espaços culturais e a cidade.

Nesse processo, o Teatro Alberto Maranhão constitui um marco de uma experiência teatral diretamente articulada ao espaço público e à dinâmica urbana da Ribeira. Sua relação com a Praça Augusto Severo evidencia uma forma de vivência na qual o acesso ao espetáculo se encontra integrado à experiência da própria cidade. O Teatro Riachuelo, por sua vez, expressa uma configuração urbana associada a uma nova lógica de centralidade no shopping, em que o percurso do espectador é mediado pelo circuito interno de circulação, serviços e lojas, fazendo com que a experiência teatral se articule a uma dinâmica de consumo e entretenimento. A diferença entre os dois espaços evidencia diferentes formas de experimentar a cidade: enquanto o Alberto Maranhão vincula-se mais diretamente à rua e à experiência do espaço público, o Riachuelo integra-se a uma experiência espacial marcada pelo consumo, pela circulação controlada e pela concentração de atividades em um ambiente privado.

Assim, esses teatros podem ser compreendidos como marcos espaciais e temporais de diferentes formas de viver uma mesma cidade. Suas localizações e formas de apropriação registram transformações nas centralidades urbanas e nas práticas sociais de Natal, permitindo observar como as mudanças da cidade também se manifestam nas maneiras pelas quais seus habitantes consomem e vivenciam os espaços de cultura.

Para além da contribuição teórica, os resultados reforçam a importância do registro e da salvaguarda das informações relacionadas aos patrimônios teatrais potiguares. Como possibilidade de continuidade da pesquisa, destaca-se a necessidade de ampliar os levantamentos dos espaços teatrais para os demais municípios do Rio Grande do Norte, contribuindo para o abastecimento e consolidação do Atlas Teatral e para o

desenvolvimento de novas análises sobre as relações entre sociedade e transformações urbanas no estado.

Referências

BARRETTO, Diogo Cardoso; FERREIRA, Angela Lúcia de Araújo; CÂMARA, Maria Júlia de Brito. Palcos da história: um olhar fenomenológico sobre os teatros Alberto Maranhão e Sandoval Wanderley. In: SEMINÁRIO DE HISTÓRIA DA CIDADE E DO URBANISMO, 18., 2024, Natal. Anais do 18º Seminário de História da Cidade e do Urbanismo: Horizontes (Im)possíveis. Natal: UFRN, 2024. Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/18-shcu-seminario-historia-cidade-urbanismo/1006766-palcos-da-historia--um-olhar-fenomenologico-sobre-os-teatros-alberto-maranhao-e-sandoval-wanderley. Acesso em: 4 jun. 2025.

CARLSON, Marvin. Places of performance: the semiotics of theatre architecture. New York: Cornell University Press, 1989.

MUÑOZ, Fernandes Ángel Luis. Arquitectura teatral (1950-2000). 2002. Disponível em: https://core.ac.uk/download/files/639/25072154.pdf. Acesso em: 24 ago. 2026.

TAKANO, Kawahara. Midway Mall. Natal, RN: Kawahara Takano, [s. d.]. Disponível em: https://kt.com.br/projeto/midway-mall/. Acesso em: 28 ago. 2026.

KON, Nelson. Teatro Riachuelo, Rafael Perrone – Natal/RN, 2010. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.nelsonkon.com.br/?s=teatro+riachuelo. Acesso em: 7 maio 2026.

LEATHERBARROW, David. Espaço dentro e fora da arquitetura. Arqtexto, Porto Alegre, n. 12, 1. sem. 2008. Disponível em: http://www.ufrgs.br/propar/publicacoes/ARQtextos/PDFs_revista_12/01_DL_espa%C3%A7o_300409.pdf. Acesso em: 24 ago. 2026.

LEATHERBARROW, David. Topographical stories: studies in landscape and architecture. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 2004.

MCCARTER, Robert; PALLASMAA, Juhani. Understanding architecture. New York: Phaidon Press, 2012.

MERLEAU-PONTY, Maurice. Fenomenologia da percepção. 4. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2011.

ROLNIK, Raquel. O que é cidade. 3. ed. São Paulo: Brasiliense, 2012.

SHIRAZI, M. Reza. Towards an articulated phenomenological interpretation of architecture: phenomenal phenomenology. London: Routledge, 2014.

SOLÉ ASSOCIADOS. Teatro Riachuelo. Porto Alegre, [s. d.]. Disponível em: https://soleassociados.com.br/teatro-riachuelo/. Acesso em: 4 maio 2026.

TEATRO RIACHUELO NATAL. Sobre o Teatro Riachuelo Natal. Natal, [s. d.]. Disponível em: https://teatroriachuelonatal.com.br/sobre-o-teatro-riachuelo-natal. Acesso em: 30 abr. 2026.

TRIBUNA DO NORTE. Nasce um teatro. Tribuna do Norte, Natal, 2 out. 2010. Disponível em: https://tribunadonorte.com.br/viver/nasce-um-teatro/. Acesso em: 30 abr. 2026.

Anexos



Figura 01: Implantação dos dois teatros na malha atual - Fonte: Produzido pelo autor a partir da base de dados da prefeitura



Figura 02: Implantação do Teatro Alberto Maranhão na década de 50 - Fonte: Acervo HCUrb



Figura 03: Implantação do Teatro Alberto Maranhão - Fonte: Disponibilizado pela Maria Júlia de Brito



Figura 04: Fachada do Teatro Alberto Maranhão - Fonte: Acervo HCUrb



Figura 05: Reforma Art Noveau Teatro Alberto Maranhão - Fonte: Acervo HCUrb



Figura 06: Retirantes em frente a antiga fachada do Teatro Alberto Maranhão - Fonte: Acervo HCUrb



Figura 07: Fachada atual do Teatro Alberto Maranhão - Fonte: Produzido pelo autor em experienciação fenomenológica, (2026)



Figura 08: Pátio do Teatro Alberto Maranhão - Fonte: Produzido pelo autor em experienciação fenomenológica, (2026)



Figura 09 - Parte interna do Teatro Alberto Maranhão - Fonte: Produzido pelo autor em experienciação fenomenológica, (2026)



Figura 10: Situação do Shopping Midway Mall - Fonte: Produzido pelo autor a partir da base de dados da prefeitura



Figura 11: Implantação do Shopping Midway Mall - Fonte: Kawahara Takano, disponível em: kt.com.br/projeto/midway-mall/



Figura 12: Shopping Midway Mall - Fonte: Produzido pelo autor em experienciação fenomenológica, (2026)



Figura 13: Pisos Midway Mall - Fonte: Kawahara Takano, disponível em: kt.com.br/projeto/midway-mall/



Figura 14: Teatro Riachuelo - Fonte: Disponibilizado ao autor pelo fotógrafo Nelson Kon (2010)



Figura 15: Teatro Riachuelo fachada - Fonte: Produzido pelo autor em experienciação fenomenológica, (2026)



Figura 16: Teatro Riachuelo no Corredor do Shopping - Fonte: Produzido pelo autor em experienciação fenomenológica, (2026)

CÓDIGO: HS1742

AUTOR: FERNANDA ALVES CURY

ORIENTADOR: ANGELA LUCIA DE ARAUJO FERREIRA

TÍTULO: DO CÊNICO AO URBANO: ESPACIALIDADES EFÊMERAS ARTICULADAS NA ‘RODINHA DO PADRE’ EM NATAL/RN.

Resumo

A conhecida como ‘Rodinha do Padre', localizada no bairro da Cidade da Esperança em Natal/RN, é um teatro em formato arena de intensa utilização por parte da comunidade para atividades transitórias. A ocupação do espaço urbano por manifestações teatrais efêmeras é um importante agente construtor de signos associados aos espaços da cidade, entendendo que a teatralidade reorganiza fluxos, permanências e relações de uso dos espaços públicos. Neste contexto, o objetivo do trabalho é analisar a repercussão dessa prática de produção e ressignificação do espaço urbano, capaz de constituir espacialidades cênicas temporárias, na promoção de novas formas de interação e versatilidade do espaço. Para tal, a pesquisa compreende o teatro para além de sua dimensão física e institucional e está fundamentada em autores que discutem a produção social do espaço em articulação com a fenomenologia, a apropriação urbana e a arquitetura teatral. Os resultados evidenciam que a cena teatral extrapola os edifícios destinados ao espetáculo, incorporando a própria rua, praças e demais espaços urbanos como arquiteturas efêmeras de representação. Nesse processo, a ocupação promovida na ‘Rodinha do Padre’ fortalece vínculos de pertencimento, amplia o acesso à cultura e reafirma o espaço público como lugar de encontro, expressão artística e exercício do direito à cidade.

Palavras-chave: Efêmero. Teatro de Arena. Movimentações cênicas. Apropriação do espaço

TITLE: From the Scenic to the Urban: Ephemeral Spatialities Articulated in the "Rodinha do Padre" in Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

Abstract

Known as the “Rodinha do Padre,” located in the Cidade da Esperança neighborhood in Natal, Rio Grande do Norte, Brazil, this arena-style theater has become a widely used community space for temporary cultural activities. The occupation of urban space through ephemeral theatrical performances plays a significant role in constructing meanings associated with the city, as theatricality reshapes movement, permanence, and patterns of use in public spaces. This study aims to analyze how these temporary scenic practices contribute to the production and re-signification of urban space, fostering new forms of interaction and spatial versatility. The research approaches theater beyond its physical and institutional dimensions, drawing on theoretical perspectives related to the social production of space, phenomenology, urban appropriation, and theatrical architecture. The findings demonstrate that theatrical performance extends beyond conventional theater buildings, transforming streets, squares, and other urban spaces into ephemeral architectures of representation. In this process, the occupation of the “Rodinha do Padre” strengthens community belonging, expands access to culture, and reinforces public space as a place for social interaction, artistic expression, and the exercise of the right to the city.

Keywords: Theater; Arena theater; Scenic practices; Urban space appropriation

Introdução

Entre a malha teatral do Rio Grande do Norte, destaca-se o Teatro de Arena da Cidade da Esperança apelidado de ‘Rodinha do Padre’, tradicional teatro de rua em formato de arena existente em Natal/RN, cuja atuação evidencia como a teatralidade se constitui a partir da ocupação temporária do espaço urbano. Hoje, o espaço caracteriza-se pela ocupação de um grupo social que não se restringe a apenas produções de cenas convencionais, mas sim cenas populares que demarcam, de ocorrência espontânea agregando valor cênico ao espaço. Suas apresentações transformam o público em um ambiente sinestésico compartilhado, no qual atores e espectadores estabelecem uma configuração espacial marcada pela proximidade, pela circulação e pela participação coletiva. Nessa condição, a cidade deixa de ser apenas cenário da representação e se torna elemento constitutivo da própria linguagem teatral, favorecendo a construção de vínculos sociais, o fortalecimento do sentimento de pertencimento e a valorização da cultura como prática rotineira. (Figura 01)

O teatro constitui uma importante manifestação cultural que estabelece relações diretas com o espaço em que se desenvolve. Embora historicamente associado a edifícios destinados à produção da dramaturgia, sua realização extrapola os limites da arquitetura teatral convencional, podendo apropriar-se de ruas, praças e demais espaços públicos como lugares de representação. Nessa perspectiva, o espaço não se limita à condição de suporte da cena, mas participa ativamente da construção da experiência teatral. Assim, a teatralidade pode emergir da interação entre cidade, arquitetura e prática artística, produzindo espacialidades efêmeras que ressignificam o núcleo urbano.

Reporta-se a concepção de Henri Lefebvre (2006), para quem o espaço urbano é uma produção social continuamente construída pelas práticas que nele se desenvolvem. Sob essa perspectiva, as manifestações efêmeras constituem formas de apropriação do espaço

público que transcendem a dimensão artística, configurando-se como práticas capazes de reorganizar temporariamente os usos da cidade, transformar sua dinâmica cotidiana e produzir novos signos para os lugares. A ocupação teatral pode converter a arquitetura urbana, em parte integrante da cena, revelando que a espacialidade cênica é construída pelas relações entre o espaço físico, os artistas e a coletividade que participa da experiência.

A interpretação de Marcos Felipe Sudré (2013), ao compreender os acontecimentos festivos como eventos capazes de interromper a lógica cotidiana da cidade e instaurar novas formas de vivência da urbis. De maneira semelhante, as manifestações teatrais efêmeras instauram centralidades temporárias que promovem encontros, estimulam a permanência nos espaços públicos e reforçam seu caráter simbólico e coletivo. Mais do que eventos transitórios, essas ocupações revelam o potencial do teatro como agente de ativação urbana, destacando que o valor cênico também se constrói pela relação entre arquitetura, cidade e sociedade. Como um conceito em construção

Apesar da relevância dessas manifestações para a produção cultural e para a dinâmica de Natal/RN, ainda são reduzidos os estudos que investigam a constituição das espacialidades cênicas efêmeras a partir da articulação entre teatro e cidade. Nesse contexto, este artigo visa analisar a ‘Rodinha do Padre’ como estudo de caso, e sua influência na promoção e ressignificação do espaço urbano, a partir das ocupações realizadas pelas batalhas de rima capazes de constituir espacialidades cênicas temporárias, na promoção de novas formas associadas ao lugar e reativação do teatro. Portanto, segue-se o caminho da interpretação baseada na observação da malha teatral urbana e o estudo de caso específico, bem como o exame dos estudos de referência.

Metodologia

A pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, fundamentada na análise da relação entre as redes teatrais articuladas em teatros edificados e as redes efêmeras. A seleção do estudo de caso faz parte da análise morfológica dos usos e ocupações que foram se estabelecendo na ‘Rodinha do Padre'. A investigação deu início pela identificação dos momentos de ocupação e pela sistematização das informações em fichas analíticas, elaboradas a partir da coleta de registros fotográficos, documentação, revisão de hemeroteca e relatos das apresentações, traduzindo-as nas observações acerca da configuração espacial de cada manifestação e o seu entorno. As fichas reuniram informações referentes à organização espacial cênica, à disposição dos espectadores, aos percursos, às permanências, às adaptabilidades espaciais e à relação entre a performance e o ambiente urbano.

O conceito de "teatros efêmeros" nos espaços públicos ainda se encontra em construção e é desenvolvido ao longo da análise apresentada neste estudo. Sua formulação é resultado da articulação entre a base empírica da pesquisa, os estudos de caso investigados e as contribuições teóricas dos autores que fundamentam este trabalho. A interpretação dos resultados foi desenvolvida por meio da articulação entre as evidências empíricas e o referencial teórico adotado, especialmente as contribuições de Marvin Carlson (1989), Henri Lefebvre (2006) e Marcos Felipe Sudré (2013), e ainda a associação com a abordagem fenomenológica, a qual destaca as experiências vividas associadas ao lugar e

percepção do espaço para além da forma arquitetônica, buscando compreender de que maneira essas práticas produzem espacialidades cênicas e restauram o espaço urbano.

O estudo vinculado com a projeto de pesquisa intitulada “Rede Teatral do Rio Grande doNorte - Uma análise fenomenológica de sua topografia e espacialidade arquitetônica” em colaboração com o grupo de pesquisa História da Cidade, do Território e Urbanismo – HCUrb –, em prol de fomentar as discussões sobre práticas de apropriação cultural associadas às instituições teatrais como instrumento de construção do pertencimento, história e do direito à cidade. Ainda, o projeto corrobora para a Elaboração do Atlas Teatral do Rio Grande do Norte com o objetivo de registrar e documentar essas instituições e alimentar o site Observatorio de Espacios Escénicos, uma rede internacional de pesquisadores com sede na ETSAB, UPC Barcelona.

Resultados e Discussões

A ‘Rodinha do Padre’ insere-se no contexto urbano do bairro Cidade da Esperança, em Natal/RN (Figura 02), concebido na década de 1960 como um conjunto habitacional planejado para atender ao intenso crescimento populacional decorrente dos fluxos migratórios provenientes do interior do estado. Apesar de responder à demanda por moradia, o projeto pioneiro de habitação social ainda não havia incorporado equipamentos públicos destinados ao lazer. (Figura 03)

De acordo com dados coletados por Gilnadson Bertuleza (2024), o Teatro de Arena da Cidade da Esperança surgiu de uma iniciativa do Centro Social Urbano (CSU), a implantação desse equipamento, datado na década de 1980, evidencia uma compreensão da arquitetura para além de sua dimensão física, reconhecendo o teatro como um elemento estruturador das relações sociais no bairro. Nessa perspectiva, Leatherbarrow (2008) defende que a experiência arquitetônica ultrapassa o edifício em si, sendo construída pelas relações estabelecidas entre as pessoas e o espaço. Portanto, diferentemente de uma edificação destinada exclusivamente à realização de espetáculos, o Teatro de Arena da Cidade da Esperança se consolida como um espaço flexível e adaptável, cuja configuração favorece sucessivas apropriações ao longo do tempo, desde um espaço destinado ao lazer e esporte, até apropriação de movimentos sociais e subculturas. Sua permanência na dinâmica urbana permitiu que diferentes manifestações culturais encontrassem nesse espaço condições para se desenvolver, adaptando seu uso às demandas da comunidade.

É nesse contexto que se insere a ‘Rodinha do Padre’. Mais do que utilizar o Teatro de Arena como local de apresentação, os grupos que se apropriam da área contribuem para reafirmar a vocação como espaço de produção cultural (Figura 04). A teatralidade efêmera produzida nas apresentações não se restringe ao acontecimento cênico, mas estabelece uma relação contínua com a história do lugar, como um equipamento de ativação de uma memória urbana associada ao encontro, à participação e ao compartilhamento da experiência artística. Dessa forma, a ocupação promovida pelos grupos que se desenvolvem com esse espaço evidencia como um equipamento urbano originalmente concebido para o lazer pode ser constantemente ressignificado e influencia a construção de uma cultura.

A continuidade dessas ocupações demonstra que a permanência do Teatro de Arena não decorre apenas de sua existência material, mas da capacidade de integrar diferentes formas de expressão artística ao longo do tempo e acolhê-las em um espaço teatral. Nesse sentido, a Rodinha do Padre representa uma continuidade desse processo histórico, reafirmando o teatro como agente de ativação do espaço urbano e evidenciando que a arquitetura se realiza quando apropriada pela vida cultural e pelas relações sociais que nela se desenvolvem. (Figura 05)

A principal característica de teatros efêmeros reside em sua natureza transitória. As apresentações possuem duração limitada, adaptabilidade ao espaço, e desmontam-se ao término do espetáculo devolvendo o espaço urbano à sua lógica cotidiana. Entretanto, a efemeridade da ação não implica a efemeridade de seus efeitos. Ao contrário, a recorrência dessas manifestações produz vínculos entre a prática teatral e o lugar, consolidando referências simbólicas que passam a integrar a memória coletiva da cidade. Na 'Rodinha do Padre', as teatralidades efêmeras se fazem constantemente presentes, a arena oferece suporte à realização dessas atividades.

O Teatro de Arena da Cidade da Esperança não pode ser compreendido apenas como um equipamento urbano implantado para o lazer, mas como um espaço permanentemente produzido pelas experiências culturais que o ocupa. As Batalhas de Rima participam desse processo ao transformar, de maneira recorrente, um espaço cotidiano em um espaço de dramaturgia, produzindo novas atmosferas durante o momento de permanência. (Figura 06)

Essa permanência simbólica da discussão de Marvin Carlson (1989), para quem os espaços de performance acumulam memórias decorrentes das sucessivas experiências ali vividas. Cada nova apresentação dialoga com as anteriores, fazendo com que o lugar seja reconhecido não apenas por sua configuração monumental e arquitetônica, mas também pelas práticas que nele se repetem. Assim, mesmo quando não há espetáculo, o Teatro de Arena preserva uma identidade associada ao encontro, à arte e à convivência comunitária. Marcas essas que são observadas em decorrência da ocupação de grupos de rima que evocam e personalizam o Teatro.

Essa compreensão apoia-se na leitura de Michel de Certeau (1994), ao reconhecer que os usos cotidianos reinventam continuamente os espaços da cidade. A apropriação recorrente do Teatro de Arena destaca que sua identidade não é determinada exclusivamente pelo projeto arquitetônico, mas pela maneira como diferentes grupos sociais, ao longo do tempo, o ocupam, reinterpretam e regeneram o espaço. Vale ainda destacar que fora as ocupações, o teatro de arena ainda inserido no núcleo urbano mantém certo estado deteriorado e de abandono, mas no momento das ocupações a teatralidade abraça o espaço para revitalizá-lo.

No caso da 'Rodinha do Padre', atualmente conhecida também pela Batalha da Esperança - grupo que produz Batalhas de Rima recorrentes no teatro -, cada apresentação reorganiza fluxos, estimula permanências e transforma a percepção do espaço público, reforçando o teatro como prática intrínseca para a manutenção do pertencimento e o direito à cidade. Desse modo, o caráter passageiro do espetáculo constitui, paradoxalmente, o elemento que sustenta a permanência de sua memória e de sua relevância na construção simbólica da Cidade da Esperança. As intervenções realizadas pelos grupos de rap reativam espaço a mais de 10 anos, sendo um movimento ativo variando as datas de ocorrência e os seus

horários. Os eventos são esporádicos e contam com a implementação de equipamentos para suporte extra as atividades.

Como discutido anteriormente, a experiência do teatro não depende exclusivamente de espaços físicos ou de estruturas formais. No caso da 'Rodinha do Padre', a teatralidade emerge da relação entre o Teatro de Arena, as performances temporárias, o público e a cidade, configurando uma arquitetura que se realiza pela ocupação e uso coletivo do espaço. Nesse sentido, a arquitetura deixa de ser compreendida apenas como objeto construído e passa a constituir uma experiência espacial produzida pelas relações que se estabelecem durante a performance.

A configuração em arena desempenha um papel fundamental nesse processo. Diferentemente do palco italiano, a exemplo do Teatro Alberto Maranhão, caracterizado pela frontalidade e pela separação entre atores e espectadores, o teatro de arena organiza a cena em torno de um centro comum, aproximando público e o influenciando a gesticular com a obra demonstrando uma redução de barreiras físicas e simbólicas entre ambos, como no teatro de cultura popular Sandoval Wanderley. A arena, portanto, não apenas abriga o espetáculo, mas condiciona a maneira como ele é percebido, fortalecendo o caráter coletivo das manifestações populares. Essa configuração se instaura majoritariamente nas ocupações cênicas realizadas na Rodinha do Padre e nas batalhas de rima agregando à experiência artística que é construída. (Figura 07)

Esse aspecto revela uma característica particularmente adequada ao teatro popular. A ausência dessa separação espacial rígida entre palco e plateia permite que o público também construa a cena. A dramaturgia deixa de estar restrita à um espaço de atuação e passa a incorporar as reações dos espectadores, os sons da cidade, a circulação de pessoas e os elementos da própria arquitetura urbana. Assim, a cena é construída coletivamente, fazendo do espaço um componente ativo da linguagem teatral.

A concepção de lugar proposta por Ana Fani Alessandri Carlos (1996) contribui para compreensão do Teatro de Arena para além do aspecto físico. Para a autora, o lugar é construído pelas experiências, pelas relações sociais e pelos usos cotidianos. Nesse sentido, a Rodinha do Padre adapta a arena para manter o sentido de lugar para quem o ocupa. O equipamento deixa de ser apenas um espaço e passa a ser reconhecido como um lugar de pertencimento, cuja identidade é continuamente construída pelas práticas culturais que ali ocorrem.

Sob essa perspectiva, a arquitetura teatral gerada pelas ocupações, não se define apenas pela monumentalidade do edifício, mas pela capacidade do espaço de acolher práticas culturais. O formato de arena torna-se, assim, uma arquitetura permanentemente disponível para novas ocupações e configurações, reafirmando que, nos teatros efêmeros, a arquitetura se completa quando é apropriada pela cultura e pela vida urbana.

A permanência das batalhas de rima no Teatro de Arena da Cidade da Esperança evidencia como as manifestações teatrais efêmeras são capazes de extrapolar o momento da apresentação e produzir impactos duradouros na dinâmica urbana. Nesse tópico, a ocupação recorrente promovida pela Batalha da Esperança fortalece o vínculo comunidade x equipamento urbano, demonstrando que a vitalidade de um espaço público está diretamente voltada à continuidade de seus usos e reusos sociais e culturais.

Cabe destacar que, fora dos momentos de ocupação, o teatro de arena, inserido no núcleo urbano, permanece em um estado de deterioração e abandono. Entretanto, durante as intervenções, a teatralidade ressignifica o espaço, transformando-o. Assim, as ocupações desempenham também um papel de cuidado e preservação do patrimônio arquitetônico, ainda que de maneira não institucionalizada, ao reativar o equipamento por meio do uso coletivo e da apropriação comunitária.

Essa perspectiva dialoga com Françoise Choay (2001), ao compreender que o patrimônio não se limita à preservação de sua materialidade, e sim depende da permanência dos significados que a sociedade lhe atribui. O Teatro de Arena mantém sua relevância não apenas por sua existência física, mas porque continua sendo apropriado como espaço de expressão artística e participação coletiva. A recorrência das apresentações da 'Rodinha do Padre' reafirma sua função cultural, transformando o equipamento em um patrimônio vivo.

A influência das ações ocorridas no lugar também pode ser observada na consolidação do Teatro de Arena como um espaço aberto a diferentes manifestações culturais. Iniciativas como o projeto "Cenas da Periferia" reforçam essa vocação ao integrar linguagens como o teatro, o grafite, as Batalhas de Rima e o break, promovendo ações coletivas que incluem apresentações artísticas e mutirões de revitalização do espaço (Figura 09). Essas iniciativas ampliam o alcance social do equipamento, estimulando a participação da comunidade e favorecendo sua identidade como um polo de produção cultural na Cidade da Esperança.

Essa dinâmica dialoga novamente com Henri Lefebvre (2006), ao compreender o espaço urbano como um produto das práticas sociais que nele se desenvolvem. Nesse viés, os espaços destinados ao uso popular demandam processos contínuos de regeneração e reativação, fundamentais para a preservação de sua função social e cultural. O equipamento cultural em questão, cuja relevância é intrínseca à malha teatral da cidade de Natal, requer especial atenção, uma vez que sua manutenção e revitalização são essenciais para assegurar a continuidade de sua atuação como espaço de produção cênica mesclado com a cultura tradicional.

Em suma, destaca-se como as ocupações esporádicas evidenciam um elevado potencial de adaptação e inclusão no tecido urbano, ao demonstrarem que a experiência cênica pode ser construída a partir da ocupação temporária, a exemplo das ocupações realizadas na Rodinha do Padre. Assim como os autos folclóricos, que têm como principal característica integrar a rua, aproximar a comunidade e fazer do cotidiano a cena, essas manifestações produzem espacialidades que, embora transitórias, deixam marcas permanentes na memória coletiva. Sua monumentalidade não está na permanência estrutural, mas na intensidade da experiência vivida, na construção de vínculos sociais e na sinestesia proporcionada pelo acontecimento teatral. Sob essa perspectiva, incorporar essa compreensão ao saber arquitetônico significa reconhecer a cidade como suporte para novas formas de teatralidade, nas quais arquitetura, espaço público e arte se articulam para ampliar o acesso à cultura. Dessa forma, os teatros efêmeros reafirmam o potencial democratizador das artes, descentralizando a produção cultural dos espaços tradicionalmente institucionalizados e ampliando sua presença na malha urbana de Natal.

Conclusão

Conforme argumenta Marvin Carlson (1989), o lugar da performance integra o próprio acontecimento cênico, sendo constituído pelas relações estabelecidas entre a encenação, a memória, os espectadores e o contexto em que ocorre. Nessa perspectiva, o estudo focado, majoritariamente, na 'Rodinha do Padre' demonstrou que os teatros ultrapassam a condição de manifestações artísticas, constituindo-se como instrumentos de reativação do espaço urbano. Ao ocupar continuamente o Teatro de Arena da Cidade da Esperança, as Batalhas de Rima reafirmam a capacidade de adaptação da arquitetura às demandas coletivas, evidenciando que a qualidade de um equipamento cultural não reside apenas em sua forma construída, mas em sua aptidão para acolher diferentes usos ao longo do tempo. A adaptabilidade socioespacial observada no Teatro de Arena permite que o espaço preserve sua essência artística e permaneça ativo na dinâmica do bairro, demonstrando que a ocupação cultural é um importante mecanismo de regeneração urbana e de preservação do patrimônio pelo uso.

Ao longo da pesquisa, foi verificado que a arquitetura teatral não se restringe ao edifício, mas sempre estabelece um diálogo entre o espaço, a obra e o público. A configuração em formato de arena potencializa essa interação ao reduzir as barreiras entre artistas e espectadores, transformando a cidade em parte integrante da dramaturgia. Durante as apresentações, o espaço adquire uma atmosfera própria. Essa característica evidencia que a espacialidade dos teatros efêmeros não está na permanência física de suas estruturas, mas na intensidade das relações sociais e sensoriais que são capazes de produzir, reafirmando o espaço urbano como lugar de encontro e construção da identidade coletiva.

Por fim, este estudo evidencia que reconhecer os teatros de rua e as ocupações cênicas efêmeras como parte do campo da arquitetura e do urbanismo amplia as possibilidades de planejamento e produção da cidade. Ao redistribuírem o acesso à produção cultural para além dos equipamentos tradicionalmente institucionalizados, essas manifestações contribuem para a formação de novas centralidades culturais, aproximando a arte do cotidiano da população e democratizando seu acesso. Nesse sentido, a 'Rodinha do Padre' demonstra que a arquitetura pode atuar como mediadora entre cultura e cidade, revelando que espaços públicos apropriados pela arte possuem potencial para regenerar ambientes urbanos, fortalecer a vida comunitária e consolidar uma rede de teatralidades distribuídas pela malha urbana de Natal. Assim, os teatros efêmeros deixam de ser compreendidos apenas como acontecimentos passageiros e passam a ser reconhecidos como agentes ativos de transformação urbana, cultural e arquitetônica.

Referências

BARRETTO, Diogo Cardoso.; FERREIRA, Angela Lucia.; CÂMARA, Maria Júlia. PALCOS DA HISTÓRIA: UM OLHAR FENOMENOLÓGICO SOBRE OS TEATROS ALBERTO MARANHÃO E SANDOVAL WANDERLEY. In: Anais do 18º Seminário de história da cidade e do Urbanismo: Horizontes (Im)possíveis. Anais...Natal(RN) UFRN, 2024. Disponível em: https//www.even3.com.br/anais/18-shcu-seminario-historia-cidade-urbanismo/1006766-PALCOS-DA-HISTORIA--UM-OLHAR-

FENOMENOLOGICO-SOBRE-OS-TEATROS-ALBERTO-MARANHAO-E-SANDOVAL-WANDERLEY. Acesso em: 04/06/2025

CARLSON, Marvin. Places of Performace. The Semiotcis of Theatre. New York: Cornel University Press, 1989.

CARLOS, Ana Fani Alessandri. O lugar no/do mundo. São Paulo: HUCITEC, 1996. (Geografia: teoria e realidade, n. 38).

CERTEAU, Michel de. A Invenção do Cotidiano. Petrópolis: Vozes, 1994.

GEHL, Jan. Life Between Buildings: Using Public Space. Washington: Island Press, 2011.7

BERTULEZA, Gilnadson da Silva. Como uma tapeçaria vibrante de experiências urbanas: a (re)utilização dos espaços coletivos pelas batalhas de rimas - o caso de Natal/RN. Orientadora: Dra. Angela Lúcia Ferreira. 2024. 266f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

LEATHERBARROW, David. Espaço dentro e fora da arquitetura. Arqtexto. n. 12. 1o sem. 2008. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/propar/publicacoes/ARQtextos/PDFs_revista_12/01_DL_espa%C3%A7o_300409.pdf>. Acesso em: 9 junho. 2023.

LEFEBVRE, Henri. A Produção do Espaço. Tradução de Doralice Barros Pereira e Sérgio Martins. 1ª versão em português, 2006. Do original La production de l'espace. 4. ed. Paris: Éditions Anthropos, 2000

NATAL (RN). Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo. Natal ontem e hoje. Natal: Departamento de Informação, Pesquisa e Estatística, 2006. 91 p.

SUDRÉ, Marcos Felipe. A Festa e a Cidade: experiência coletiva, poder e excedente no espaço urbano. Rio de Janeiro: Letra Capital, 2013

SHIRAZI, M. Reza. Towards an articulated phenomenological interpretation of architecture: phenomenal phenomenology. 1a Ed. London: Routledge, 2014.

Anexos



Figura 01 - Ocuação da 'Batalha da Esperança' no Teatro de Arena em 2019. - Fonte: Imagem cedida por Elielton Rocha.



Figura 02 - Vista parcial do até então novo bairro de Cidade da Esperança na década de 1960. - Acervo do fotógrafo Jaeci E. Galvão Natal Ontem e Hoje



Figura 03 - Localização do Teatro de Arena da Cidade da Esperança. - Fonte: Produzido pelo autor a partir do mapa disponibilizado pela SEMURB.



Figura 04 - Batalha da Esperança na ‘Rodinha do Padre’ - Fonte: Instagram do grupo organizador da Batalha da Esperança.



Figura 05 - Programação ativa na Rodinha do Padre. - Fonte: Instagram do grupo organizador da Batalha da Esperança. -



Figura 06 - Mostra comparativa entre a ocupação e a ausência dela no espaço. - Fonte: Instagram do grupo organizador da Batalha da Esperança. e visita em loco.



Figura 07 Formato em Arena - Fonte: Pesquisa in loco em 2026.



Figura 08 Arte em mosaicos de iniciativa comunitária na ‘Rodinha do Padre’. - Fonte: Pesquisa in loco em 2026.

CÓDIGO: SB0107

AUTOR: FRANCISCO SANDRO VIDAL DA SILVA

COAUTOR: THAÍS BEZERRA VERÍSSIMO MIGUEL

COAUTOR: SUIAN MOREIRA SANTOS FONTES

COAUTOR: GLÓRIA LOUINE VITAL DA COSTA

COAUTOR: KATIA NICOLAU MATSUI

ORIENTADOR: LIANA FRANCO PADILHA

TÍTULO: Formulação de revestimento à base de amido da semente de jaca (Artocarpus heterophyllus) e extrato do resíduo de tamarindo e sua aplicação em tomates (Solanum lycopersicum).

Resumo

Este estudo avaliou o efeito de um revestimento comestível elaborado com amido proveniente de sementes de jaca e extrato de resíduos de tamarindo na conservação pós-colheita de tomates. Os frutos foram armazenados em temperatura ambiente e sob refrigeração, com e sem a aplicação do revestimento, durante um período de 28 dias.Foram avaliados parâmetros relacionados à qualidade físico-química dos frutos, incluindo perda de massa, pH, acidez titulável e sólidos solúveis. Os resultados demonstraram que a perda de massa aumentou ao longo do período de armazenamento, sendo menor nos tomates revestidos e mantidos sob refrigeração. Esse comportamento pode estar relacionado à formação de uma barreira semipermeável proporcionada pelo revestimento, contribuindo para a redução da perda de água pelos frutos.Também foram observadas alterações nos parâmetros químicos durante o armazenamento, incluindo aumento dos valores de pH e variações na acidez titulável e nos sólidos solúveis. De modo geral, os frutos submetidos ao revestimento e ao armazenamento refrigerado apresentaram maior estabilidade desses parâmetros, indicando menor intensidade das alterações associadas ao processo de amadurecimento

Palavras-chave: Revestimento, tomates, preservação, resíduo

TITLE: Formulation of a coating based on jackfruit seed (Artocarpus heterophyllus) starch and tamarind residue extract, and its application to tomatoes (Solanum lycopersicum).

Abstract

This study evaluated the effect of an edible coating made from jackfruit seed starch and tamarind residue extract on the postharvest preservation of tomatoes. The fruits were stored at room temperature and under refrigeration, with and without the coating, for a period of 28 days. Parameters related to the physicochemical quality of the fruits were evaluated, including weight loss, pH, titratable acidity, and soluble solids. The results showed that mass loss increased over the storage period but was lower in coated tomatoes kept under refrigeration. This behavior may be related to the formation of a semipermeable barrier provided by the coating, which helps reduce water loss from the fruits. Changes in chemical parameters were also observed during storage, including increases in pH values and variations in titratable acidity and soluble solids. Overall, the fruits that underwent coating and refrigerated storage exhibited greater stability in these parameters, indicating a lower intensity of changes associated with the ripening process.

Keywords: Coating, tomatoes, preservation, residue

Introdução

O cultivo de frutas e hortaliças apresenta grande importância econômica e social, contribuindo para a geração de emprego, renda e para o abastecimento alimentar. Entre as hortaliças de maior relevância, o tomate (Solanum lycopersicum L.) destaca-se pelo seu valor econômico e nutricional. Entretanto, por apresentar comportamento climatérico, o fruto sofre intensas alterações metabólicas após a colheita, incluindo o aumento da produção de etileno e da atividade respiratória, fatores que aceleram o amadurecimento, a senescência e, consequentemente, as perdas durante o armazenamento, transporte e comercialização (Marta et al., 2025; Silva et al., 2024; FAO, 2019).

Entre as estratégias estudadas, os revestimentos comestíveis e biodegradáveis têm se mostrado uma alternativa promissora para a conservação de frutas e hortaliças. Esses materiais podem formar uma barreira semipermeável sobre a superfície dos frutos, contribuindo para a redução das trocas gasosas, da perda de água e da atividade metabólica, fatores diretamente relacionados à conservação da qualidade pós-colheita (Falguera et al., 2011).

O amido apresenta potencial para aplicação na elaboração desses revestimentos devido à sua capacidade de formar filmes, ao baixo custo e à disponibilidade em diferentes fontes vegetais. Além disso, sua obtenção a partir de resíduos agroindustriais representa uma alternativa sustentável, pois possibilita o aproveitamento de subprodutos e agrega valor a materiais que poderiam ser descartados (Rhim et al., 2013; Hassan et al., 2018; Zhang et al., 2020; Souza et al., 2021).

A incorporação de extratos naturais aos revestimentos também pode conferir propriedades funcionais adicionais, especialmente devido à presença de compostos bioativos. O extrato de tamarindo, por exemplo, apresenta compostos fenólicos e ácidos orgânicos que demonstram potencial para aplicações relacionadas à conservação de produtos vegetais (Hoskin et al., 2019; Zhang et al., 2024).

Estudos anteriores indicam que revestimentos comestíveis à base de polissacarídeos e outros biopolímeros podem contribuir para a redução da perda de massa e para a manutenção da qualidade físico-química de tomates durante o armazenamento (Ali et al., 2010; Ali et al., 2019; Yadav et al., 2022). Entretanto, ainda são limitados os estudos que avaliam especificamente a combinação do amido obtido de resíduos de jaca com extrato proveniente de resíduos de tamarindo para aplicação em tomates submetidos a diferentes condições de armazenamento.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de um revestimento biodegradável elaborado com amido residual de jaca e extrato de resíduo de tamarindo sobre a conservação pós-colheita de tomates. Foram avaliados parâmetros relacionados à qualidade dos frutos, incluindo perda de massa, pH, acidez titulável, sólidos solúveis, taxa respiratória e características colorimétricas, durante 28 dias de armazenamento em temperatura ambiente e sob refrigeração.

Metodologia

Preparo do extrato de resíduo de tamarindo

O extrato foi obtido a partir do resíduo de tamarindo utilizando concentração de 10% (m/v), com adaptações das metodologias propostas por Hoskin et al. (2019) e Eller et al. (2015). Inicialmente, 42 g do resíduo foram submetidos à secagem em estufa com circulação de ar a 60 °C durante 48 h. Após a secagem, o material foi triturado até a obtenção de um pó homogêneo.

Posteriormente, o resíduo seco foi submetido à extração com 420 mL de solução hidroalcoólica, constituída por água destilada e etanol 95% na proporção de 50:50 (v/v). A extração foi realizada sob agitação e temperatura de 80 °C por 2 h, conforme adaptações das metodologias descritas por Hoskin et al. (2019) e Eller et al. (2015). A utilização da temperatura elevada teve como finalidade favorecer a solubilização dos compostos presentes no material vegetal.

Após a etapa de extração, a suspensão foi submetida à filtração a vácuo e posteriormente centrifugada a 4200 rpm por 20 min. O sobrenadante obtido foi concentrado em rota-evaporador a 50 °C, até que seu volume fosse reduzido em pelo menos 50%, permitindo também a remoção do etanol, conforme procedimento baseado em Hoskin et al. (2019).

Formulação do revestimento

A formulação do revestimento foi elaborada utilizando 4% (m/v) de amido de semente de jaca e 2% (m/v) de glicerol, empregado como agente plastificante, seguindo a metodologia descrita por Miguel (2023).

Considerando que a gelatinização do amido de semente de jaca ocorre em torno de 95 °C, o extrato de tamarindo foi incorporado somente após o resfriamento da solução filmogênica até 50 °C. Essa estratégia foi adotada com o intuito de reduzir possíveis

perdas dos compostos antioxidantes presentes no extrato em função da exposição a temperaturas mais elevadas. Após a incorporação, a mistura foi homogeneizada durante 5 min, obtendo-se uma formulação uniforme.

Delineamento experimental

O experimento foi organizado em um delineamento fatorial, considerando como fatores experimentais a temperatura de armazenamento e a presença ou ausência do revestimento. Foram utilizadas duas condições de temperatura, 25 °C e 4 °C, combinadas com as duas condições de aplicação do revestimento.

Dessa combinação foram estabelecidos quatro tratamentos: tomates revestidos armazenados a 25 °C (TCRA), tomates revestidos mantidos sob refrigeração (TCRR), tomates sem revestimento armazenados a 25 °C (TSRA) e tomates sem revestimento mantidos sob refrigeração (TSRR).

As avaliações foram realizadas durante 28 dias, nos períodos de 0, 7, 14, 21 e 28 dias. Para as análises físico-químicas, foi adotado um sistema de amostragem destrutiva, utilizando amostras independentes em cada período experimental. A perda de massa foi determinada pela diferença entre a massa registrada inicialmente e aquela obtida em cada período de armazenamento.

Análises físico-químicas

A perda de massa foi determinada pela pesagem dos frutos no início do experimento e durante o armazenamento, sendo os resultados expressos como porcentagem da massa inicial. O cálculo foi realizado considerando a massa inicial e a massa correspondente a cada período de avaliação.

O pH foi determinado utilizando pHmetro de bancada previamente calibrado com soluções padrão de pH 4,0 e 7,0, seguindo as recomendações da AOAC (2016). A acidez titulável foi determinada e os resultados expressos em gramas de ácido cítrico por 100 g de amostra.

Os sólidos solúveis totais foram determinados por meio de refratômetro, sendo os resultados expressos em °Brix. A análise foi realizada nos frutos coletados nos diferentes períodos de armazenamento (0, 7, 14, 21 e 28 dias), permitindo acompanhar as alterações no conteúdo de sólidos solúveis ao longo do período experimental.

Os valores obtidos foram utilizados como indicador das alterações relacionadas ao amadurecimento dos frutos durante o armazenamento. No documento, essa variável apresentou tendência geral de redução ao longo do período experimental.

Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), seguida do teste de comparação de médias de Tukey, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas utilizando os softwares Statistica® versão 10.0 e Origin 2021 (Northampton, Massachusetts, EUA).

Resultados e Discussões

Perda de massa

A Figura 1 apresenta a evolução da perda de massa dos tomates ao longo dos 28 dias de armazenamento, nas condições de temperatura ambiente e refrigeração, com e sem aplicação do revestimento. Observa-se uma tendência de aumento progressivo da perda de massa ao longo do armazenamento, independentemente da condição avaliada.Os frutos armazenados em temperatura ambiente apresentaram maior perda de massa em comparação àqueles mantidos sob refrigeração. Esse comportamento foi mais evidente nos frutos sem revestimento, que apresentaram aumento mais acentuado da perda de massa ao longo do período experimental. Ao final dos 28 dias, a perda de massa atingiu aproximadamente 13,85% nos frutos sem revestimento mantidos em temperatura ambiente, enquanto os frutos revestidos nessa mesma condição apresentaram perda de aproximadamente 4,92%. Sob refrigeração, os valores permaneceram consideravelmente menores, correspondendo a aproximadamente 1,38% para os frutos sem revestimento e 1,41% para os frutos revestidos.A menor perda de massa observada nos frutos revestidos pode estar relacionada à formação de uma barreira física sobre a superfície dos frutos, capaz de reduzir a transferência de vapor de água para o ambiente. Esse efeito foi particularmente evidente durante o armazenamento em temperatura ambiente, no qual a ausência do revestimento resultou em maior perda de massa.

pH

Os valores de pH aumentaram significativamente ao longo do armazenamento em todos os tratamentos (Figura 2). Esse comportamento está associado ao avanço do amadurecimento dos frutos e à utilização de ácidos orgânicos como substratos durante os processos metabólicos.A influência da temperatura foi evidente, uma vez que os frutos armazenados em temperatura ambiente apresentaram, de modo geral, maiores valores de pH em comparação aos frutos refrigerados. O aumento mais pronunciado do pH em temperaturas mais elevadas pode estar relacionado à maior atividade metabólica e ao consequente consumo de ácidos orgânicos.Em relação ao revestimento, sua aplicação apresentou efeito menos pronunciado sobre o pH quando comparada à influência da temperatura. Os frutos revestidos e não revestidos apresentaram comportamentos semelhantes ao longo do armazenamento, indicando que o revestimento atuou principalmente sobre as trocas gasosas e a atividade metabólica, sem alterar de maneira expressiva o perfil de pH dos frutos.As diferenças observadas nos valores iniciais de pH entre os tratamentos podem estar relacionadas à variabilidade natural dos frutos, especialmente quanto ao estágio de maturação no momento da colheita e da análise.

Acidez titulável total (ATT)

A acidez titulável total (ATT) apresentou variações ao longo do período de armazenamento, sem tendência linear definida entre os tratamentos (Figura 3). Foram

observados períodos de redução e de aumento da acidez, evidenciando o comportamento dinâmico desse parâmetro durante o amadurecimento.A redução da acidez em determinados períodos pode estar relacionada ao consumo de ácidos orgânicos durante a respiração. Entretanto, os aumentos pontuais observados indicam que a dinâmica dos ácidos orgânicos pode envolver simultaneamente processos de síntese, degradação e interconversão de metabólitos durante o armazenamento.A temperatura também influenciou o comportamento da ATT. De maneira geral, os frutos armazenados sob refrigeração apresentaram menor variação dos valores de acidez em comparação aos mantidos em temperatura ambiente, o que pode estar relacionado à redução da atividade metabólica em temperaturas mais baixas.Quanto ao efeito do revestimento, observou-se maior estabilidade da acidez em determinados períodos de armazenamento nos frutos revestidos. Esse comportamento pode estar associado à redução das trocas gasosas e da atividade respiratória proporcionada pelo revestimento.

Sólidos solúveis (Brix º)

Os teores de sólidos solúveis totais apresentaram variações ao longo do armazenamento, com tendência geral de redução dos valores (Figura 4). Essa redução pode estar associada ao consumo de açúcares e outros compostos solúveis durante a atividade respiratória, uma vez que esses constituintes participam do metabolismo energético dos frutos.A temperatura de armazenamento influenciou a dinâmica dos sólidos solúveis. Os frutos mantidos sob refrigeração apresentaram, de modo geral, menor variação dos valores de °Brix em comparação aos frutos armazenados em temperatura ambiente. A maior estabilidade observada sob refrigeração pode estar relacionada à redução da atividade respiratória e, consequentemente, ao menor consumo de substratos metabólicos.A aplicação do revestimento também contribuiu para a manutenção dos valores de sólidos solúveis ao longo do armazenamento. Os frutos revestidos apresentaram menor variação de °Brix em comparação aos frutos não revestidos, comportamento que pode estar relacionado à formação de uma barreira semipermeável capaz de reduzir as trocas gasosas e a atividade respiratória.

Análise estatística

Para a perda de massa, foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ($p < 0,05$), evidenciando o efeito do revestimento e da temperatura de armazenamento. Os frutos revestidos apresentaram menores perdas de massa, principalmente quando armazenados em temperatura ambiente. Sob refrigeração, os valores foram de 1,4060% para frutos revestidos e 1,3793% para frutos sem revestimento, enquanto em temperatura ambiente foram observados 4,9170% e 13,8485%, respectivamente.No pH, foram observadas diferenças estatisticamente significativas ao longo do armazenamento, com aumento dos valores durante o período experimental. As diferenças entre tratamentos também foram evidenciadas pelo teste de Tukey, sendo a temperatura um dos fatores associados às variações observadas.A acidez titulável total (ATT) apresentou diferenças estatísticas entre determinados períodos e tratamentos ($p \leq 0,05$), embora os valores tenham apresentado comportamento oscilatório ao longo do armazenamento. As comparações pelo teste de Tukey evidenciaram diferenças entre as médias apresentadas.Os sólidos solúveis totais (°Brix) também apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre determinados períodos e tratamentos. A comparação das médias pelo teste de Tukey demonstrou variações ao longo dos 28 dias de armazenamento.De forma geral, a análise estatística demonstrou que o período de

armazenamento, a temperatura e a aplicação do revestimento influenciaram determinados parâmetros de qualidade dos tomates, sendo os efeitos mais evidentes para perda de massa, pH, acidez titulável e sólidos solúveis.

Conclusão

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a aplicação de um revestimento comestível elaborado a partir de amido proveniente de sementes de jaca e extrato de resíduos de tamarindo apresenta potencial para contribuir com a conservação pós-colheita de tomates. A utilização desses resíduos agroindustriais como matéria-prima para a elaboração do revestimento também evidencia uma alternativa alinhada aos princípios de sustentabilidade e aproveitamento de subprodutos, agregando valor a materiais que normalmente seriam descartados.

Ao longo dos 28 dias de armazenamento, observou-se aumento progressivo da perda de massa dos frutos em todos os tratamentos, comportamento esperado em função da perda de água e da atividade metabólica dos tomates. Entretanto, os frutos submetidos ao revestimento apresentaram menor perda de massa, principalmente quando associados ao armazenamento sob refrigeração. Esse comportamento sugere que o revestimento atuou como uma barreira semipermeável, reduzindo a transferência de água entre o fruto e o ambiente e, consequentemente, contribuindo para a manutenção da massa dos tomates.

Em relação aos parâmetros químicos, foram observadas alterações nos valores de pH, acidez titulável e sólidos solúveis durante o armazenamento, indicando a ocorrência de modificações metabólicas características do processo de amadurecimento. De modo geral, os frutos revestidos e mantidos sob refrigeração apresentaram maior estabilidade desses parâmetros quando comparados aos tratamentos sem revestimento e/ou armazenados em temperatura ambiente. Esses resultados indicam que a combinação entre o revestimento e a baixa temperatura pode ter contribuído para retardar as transformações físico-químicas associadas ao amadurecimento.

A refrigeração mostrou-se, portanto, uma estratégia importante para potencializar o efeito do revestimento, uma vez que a redução da temperatura contribui para diminuir a atividade metabólica e a velocidade das reações relacionadas à maturação e à deterioração dos frutos. A associação dessas duas estratégias apresentou melhores condições para preservar as características avaliadas durante o período experimental.

Dessa forma, o revestimento à base de amido de sementes de jaca e extrato de resíduos de tamarindo mostrou-se uma alternativa promissora para a conservação pós-colheita de tomates, especialmente quando combinado ao armazenamento refrigerado. Além de contribuir para a redução da perda de massa e para uma maior estabilidade dos parâmetros físico-químicos, sua utilização possibilita o aproveitamento de resíduos agroindustriais, favorecendo o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis para a cadeia de produção de alimentos.

Referências

ALI, A.; MAQBOOL, M.; RAMACHANDRAN, S.; ALDERSON, P. G. Gum arabic as a novel edible coating for enhancing shelf-life and improving postharvest quality of tomato (Solanum lycopersicum L.). Postharvest Biology and Technology, v. 58, p. 42–47, 2010. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2010.05.005.

ALI, M.; BATOOL, S.; KHALID, N.; ALI, S.; RAZA, M. A.; LI, X.; LI, F.; XINHUA, Z. Recent trends in hydrogen-associated treatments for maintaining the postharvest quality of fresh and fresh-cut fruits and vegetables: A review. Food Control, v. 156, 110114, 2023. DOI: 10.1016/j.foodcont.2023.110114.

AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 20. ed. Gaithersburg, MD: AOAC International, 2016.

FALGUERA, V.; QUINTERO, J. P.; JIMÉNEZ, A.; MUÑOZ, J. A.; IBARZ, A. Edible films and coatings: structures, active functions and trends in their use. Trends in Food Science & Technology, v. 22, n. 6, p. 292–303, 2011. DOI: 10.1016/j.tifs.2011.02.004.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). The future of food and agriculture: alternative pathways to 2050. Rome: FAO, 2019.

GUERRA, I. C. D. et al. The effects of composite coatings containing chitosan and Mentha (piperita L. or × villosa Huds) essential oil on postharvest mold occurrence and quality of table grape cv. Isabella. Innovative Food Science and Emerging Technologies, v. 34, p. 112–121, 2016.

HASSAN, B.; CHATHA, S. A. S.; HUSSAIN, A. I.; ZIA, K. M.; AKHTAR, N. Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: a review. International Journal of Biological Macromolecules, v. 109, p. 1095–1107, 2018.

HOSKIN, R. T. et al. Blueberry Polyphenol-Protein Food Ingredients: The Impact of Spray Drying on the in Vitro Antioxidant Activity, Anti-Inflammatory Markers, Glucose Metabolism and Fibroblast Migration. Food Chemistry, v. 280, p. 187–194, 2019.

JORGE, N.; MALACRIDA, C. R. Extratos de sementes de mamão (Carica papaya L.) como fonte de antioxidantes naturais. Alimentos e Nutrição, v. 19, p. 337–340, 2008.

MACIEL, M. J. et al. Avaliação do extrato alcoólico de hibisco (Hibiscus sabdariffa L.) como fator de proteção antibacteriana e antioxidante. Revista do Instituto Adolfo Lutz, v. 71, n. 3, p. 462–470, 2012.

MIGUEL, T. B. V. Desenvolvimento de filmes biodegradáveis a partir do amido da semente de jaca (Artocarpus heterophyllus Lam.) com a incorporação de resíduo de

acerola (Malpighia emarginata). 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — PPGEQ/CT/UFRN.

PELLÁ, M. C. G. et al. Effect of gelatin and casein additions on starch edible biodegradable films for fruit surface coating. Food Chemistry, v. 309, 125764, 2020.

RHIM, J. W.; MOHAMMAD, A.; NG, P. K. W. Preparation and characterization of agar/silver nanoparticles composite films with antimicrobial activity. Food Hydrocolloids, v. 33, n. 2, p. 327–335, 2013. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2013.04.002.

ROCHA, A. J. A. C. Avaliação do potencial antimicrobiano do extrato da acerola. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) — DEQEA/CT/UFSC.

YADAV, A.; KUMAR, N.; UPADHYAY, A.; SETHI, S.; SINGH, A. Edible coating as postharvest management strategy for shelf-life extension of fresh tomato (Solanum lycopersicum L.): An overview. Journal of Food Science, v. 87, n. 6, p. 2256–2290, 2022. DOI: 10.1111/1750-3841.16145.

Anexos



Gráfico e Tabela 1



Gráfico e Tabela 2



Gráfico e Tabela 3



Gráfico e Tabela 4

CÓDIGO: SB0170

AUTOR: ERICK LUIS BARRETO DE PAIVA SIMEONI

COAUTOR: SUIAN MOREIRA SANTOS FONTES

ORIENTADOR: LIANA FRANCO PADILHA

TÍTULO: APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA KOMBUCHA PARA PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MEMBRANAS DE CELULOSE

Resumo

O crescimento exponencial do mercado global de kombucha tem gerado grande volume de biofilme residual (SCOBY), fonte sustentável e de baixo custo de celulose bacteriana (CB). Este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar membranas porosas de CB a partir de resíduos da fermentação de chá verde, utilizando prensagem a quente e reticulação química. A CB foi obtida via polimerização por Komagataeibacter xylinus e purificada com NaOH e ácido acético para remoção de impurezas. A síntese empregou álcool polivinílico (PVA) como ligante, ácido cítrico como agente reticulante e cloreto de sódio (NaCl) para promover porosidade pelo método Salt Leaching Using Powder (SLUP). O principal desafio técnico identificado foi a hornificação: a secagem prévia em estufa causou colapso irreversível das nanofibras, reduzindo a reatividade química do material. A solução adotada foi a trituração por via úmida, que preservou a área superficial e os grupos hidroxila necessários para a reticulação. Resultados de FTIR confirmaram a formação de ligações éster (pico em 1730 cm^{-1}) nas amostras reticuladas, enquanto a MEV validou qualitativamente a eficácia do método SLUP na criação da rede porosa. Embora limitações no controle térmico do molde e na pressão da prensa tenham impedido a caracterização funcional completa, o estudo demonstra o potencial do reaproveitamento biotecnológico na criação de novos biomateriais.

Palavras-chave: SCOBY, celulose bacteriana, CB, prensagem, reticulação, PVA, AC.

TITLE: Utilization of Kombucha Residues for the Production and Characterization of Cellulose Membranes

Abstract

The exponential growth of the global kombucha market has generated a significant volume of residual biofilm (SCOBY), which shows itself as a sustainable and low-cost source of bacterial cellulose (BC). This study aims to develop and characterize porous BC membranes from green tea fermentation residues, utilizing hot-pressing techniques

and chemical crosslinking. The BC was obtained via polymerization by microorganisms such as Komagataeibacter xylinus and purified with sodium hydroxide (NaOH) and acetic acid to remove impurities. The membrane synthesis employed polyvinyl alcohol (PVA) as a binder, citric acid as a crosslinking agent, and sodium chloride (NaCl) to promote porosity through the Salt Leaching Using Powder (SLUP) method. During the process, hornification was identified as the primary technical challenge, where prior oven-drying caused irreversible collapse of the nanofibers, drastically reducing the material's chemical reactivity. The adopted solution was wet-grinding, which preserved the surface area and hydroxyl groups necessary for crosslinking. FTIR results confirmed the formation of ester bonds (peak at 1730 cm^{-1}) in crosslinked samples, while SEM analysis qualitatively validated the efficacy of the SLUP method in creating a porous network. Although limitations in the mold's thermal control and press pressure prevented full functional characterization, the study demonstrates the potential of biotechnological reuse for the creation of new biomaterials.

Keywords: SCOBY, bacterial cellulose, CB, pressing, crosslinking, PVA, CA.

Introdução

A kombucha é uma bebida fermentada obtida pela fermentação de chá adoçado inoculado com um consórcio simbiótico de bactérias e leveduras, denominado SCOBY (Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast). O processo fermentativo do chá ocorre em condições aeróbias e à temperatura ambiente, em que as leveduras presentes no SCOBY convertem a sacarose em frutose e glicose e em seguida são metabolizadas em etanol. Em seguida, as bactérias ácido-acéticas oxidam o etanol, produzindo ácido acético e outros ácidos orgânicos (Su et al., 2023; Yim et al., 2017). A espécie Komagataeibacter xylinus (antes conhecida como Acetobacter xylinum) é a responsável pela polimerização da glicose em nanofibras de celulose na interface líquido-ar, formando um biofilme de celulose bacteriana que constitui grande parte da estrutura sólida do SCOBY (Jayabalan et al., 2014; Yim et al., 2017). Os trabalhos, como os de Kumar et al. (2019) e Rastogi & Banerjee (2020), fazem um estudo sobre as condições de cultivo e demonstraram que a otimização de parâmetros como pH, temperatura, concentração de açúcar e composição do inóculo permite aumentar significativamente o rendimento e a qualidade da celulose bacteriana (CB) produzida, viabilizando sua obtenção em escala laboratorial e industrial. De forma complementar, Yim et al. (2017) evidenciaram que a escolha das fontes de nitrogênio e carbono exerce influência direta sobre propriedades estruturais da CB, como espessura, densidade e resistência mecânica, o que ressalta a importância do controle cuidadoso das variáveis do processo fermentativo para adequar o material à aplicação pretendida. No campo biomédico, a CB obtida a partir da kombucha tem sido estudada para aplicações como curativos e coberturas para cicatrização de feridas, já que sua estrutura nanofibrilar altamente hidratada favorece a manutenção de um ambiente úmido adequado para a regeneração tecidual, além de oferecer proteção mecânica contra contaminações externas (Naomi et al., 2020). Estudos recentes também investigam seu uso como scaffolds (estruturas tridimensionais porosas) para engenharia de tecidos, incluindo membranas utilizadas em neurocirurgias e implantes oftalmológicos, explorando sua biocompatibilidade e resistência mecânica (Naomi et al., 2020). No âmbito das embalagens e materiais biodegradáveis, pesquisas têm demonstrado que a CB pode ser combinada com outros polímeros naturais, como o amido, para originar filmes ativos e inteligentes com propriedades antioxidantes e

antimicrobianas, constituindo uma alternativa sustentável aos materiais derivados do petróleo (Medina-Jaramillo et al., 2017). No âmbito da indústria química, as membranas porosas são ferramentas de extrema utilidade para processos de separação. No tratamento de efluentes, essa tecnologia oferece uma rota de alta eficiência para processar misturas, como lixiviados de aterros sanitários e emulsões de óleo em água (Delcolle, 2010). Diferente dos métodos convencionais, os processos de separação por membranas operam com baixo consumo energético e sem a dependência de aditivos químicos, permitindo a remoção seletiva de poluentes e macromoléculas. Na indústria alimentícia, as membranas são muito usadas nos setores de clarificação de sucos e refino de açúcar. (Medina-Jaramillo et al., 2017; Delcolle, 2010). Nesse contexto, o presente trabalho propõe o aproveitamento do SCOBY da kombucha como fonte de celulose bacteriana (CB) para a síntese e caracterização de membranas obtidas por prensagem a quente, utilizando agentes porogênicos e ligantes reticulantes, inserindo-se na busca por alternativas sustentáveis aos materiais derivados do petróleo que representam um dos principais desafios do século XXI (OEC, 2021).

Metodologia

Produção da kombucha e obtenção da CB Inicialmente, a celulose bacteriana foi obtida a partir do SCOBY da kombucha de chá fermentado. A Figura 9 a seguir ilustra de maneira simplificada como o processo da produção da kombucha e obtenção da CB foi realizado. Figura 9: Processo de produção da kombucha e obtenção da CB. Fonte: Autor, 2026. A produção do substrato foi iniciada pela fervura de água destilada, seguida da infusão de folhas de chá verde a granel, acondicionadas em saco permeável, na concentração de 6 g/L, durante 5 minutos. Após a infusão, o saco contendo as folhas foi removido e adicionou-se açúcar cristal branco ao chá, sob agitação, até atingir a concentração de 80 g/L, correspondente a 8% (m/v) de sacarose. A solução obtida foi mantida em repouso à temperatura ambiente por 24 h para resfriamento. Em seguida, adicionou-se starter (chá previamente fermentado contendo o inóculo) em volume correspondente a 15% do volume total da solução. A mistura inoculada foi transferida para recipientes de vidro previamente higienizados e esterilizados em autoclave a 121 °C por 15 minutos. Após o enchimento, os recipientes foram cobertos com papel-toalha, fixado com elásticos, e mantidos à temperatura ambiente durante 21 dias para a realização da fermentação e consequente formação e crescimento do SCOBY. Purificação da CB Os biofilmes de celulose foram submetidos a tratamento alcalino utilizando solução de NaOH 1 M. A solução foi aquecida a 80 °C e os SCOBYs foram imersos por 2 h, visando à remoção de impurezas, resíduos do meio de cultivo e células microbianas aderidas. Após o tratamento alcalino, a celulose bacteriana (CB) foi removida da solução e submetida a sucessivas lavagens com água destilada, visando à remoção do NaOH residual retido entre as fibras. Em seguida, realizou-se a etapa de neutralização ácido-base por meio da imersão da CB em solução de ácido acético a 1% (v/v) durante 30 min, com o objetivo de neutralizar eventuais resíduos de NaOH remanescentes. Após esse período, a celulose foi novamente submetida a sucessivas lavagens com água destilada até que o pH da água de lavagem e da própria celulose atingisse valores próximos da neutralidade. Determinação da umidade da celulose purificada Após a obtenção da celulose purificada, foi realizada a secagem de 3 amostras de CB purificada em estufa para a determinação da umidade. As amostras foram secas à temperatura ambiente num dessecador por 48h e em seguida, suas massas iniciais foram pesadas antes de secas na estufa. As amostras foram inseridas na estufa a

60 °C até que suas massas fossem constantes. A umidade foi determinada pela diferença entre a massa úmida e a massa seca. Síntese das membranas por prensagem térmica Foi implementada a prensagem a quente para fins de padronização da espessura da membrana final, verificando-se a influência da temperatura e da pressão no processo de formação da membrana reticulada. Trituração da celulose Antes da prensagem, a celulose purificada foi triturada em um liquidificador comum durante 5 minutos, obtendo uma solução branca de celulose e água que, em seguida, foi filtrada a vácuo. A Figura 10 mostra o sistema de filtração a vácuo utilizado, composto por uma bomba de vácuo (Solab, SL-61) ligada por uma mangueira plástica à um kitasato montado com um funil de Büchner e papel filtro. Figura 10: Sistema de filtração a vácuo. Fonte: Autor, 2026. Preparação da mistura Foi estimada uma quantidade de celulose como matriz de 45% a partir do trabalho de Khin et al. (2024) onde membranas com proporções próximas de 50% obtiveram melhor desempenho mecânico comparado a proporções menores de celulose. Pesou-se as quantidades de PVA, ácido cítrico e NaCl levando em conta a quantidade real de celulose na pasta. A proporção em massa de CB, NaCl, PVA e ácido cítrico na mistura foi de, respectivamente, 0,45:0,3:0,15:0,1. Fez-se a adição do PVA pesado em um Becker com uma quantidade mínima de água (~5 mL) sob agitação e aquecimento entre 80 e 90 °C até que todo o sólido fosse dissolvido. Em seguida, adicionou-se o ácido cítrico à solução e, quando homogênea, desligou-se o aquecimento e esperou-se esfriar até 50 °C. Posteriormente, adicionou-se a solução à pasta seca de celulose, misturando manualmente com bastão de vidro até homogeneizar a mistura para promover o melhor contato com a CB. Depois de homogeneizada, adicionou-se a quantidade de NaCl na pasta. A Figura 11 mostra a composição, quantidade de cada componente e o método de processamento de cada membrana. Figura 11: Tabela com a metodologia de síntese para cada membrana. Fonte: Autor, 2026. Só foi possível fazer uma membrana por mistura, por insuficiência de celulose bacteriana disponível para o presente estudo, pois a sua produção é demorada e seu rendimento é baixo, fazendo-se necessário grandes quantidades de kombucha por vez. Prensagem a quente Uma parte da mistura foi transferida para para o molde metálico, e em seguida, levado à prensa hidráulica manual (RIKEN P-1B) onde a mistura e o molde foram submetidos a uma pressão de aproximadamente 500 kgf/cm² e aquecidos por uma manta de aquecimento, monitorando a temperatura entre 120-130 °C com um termômetro digital por 2 horas. Promoção de porosidade (salt leaching) Imergiu-se a membrana seca em um bécker com aproximadamente 100mL de água destilada para retirar o NaCl por lixiviação. A membrana inicialmente fica na parte inferior do bécker, agitando com um bastão de vidro para não dobrar ou quebrar a membrana. Depois de 10 minutos, fez-se a troca da água com turbidez devido ao NaCl dissolvido, repetindo até que a água do bécker não apresente turbidez perceptível. Caracterização morfológica das membranas Foram realizadas as análises: FTIR (Lyza 7000) para verificar e comparar as bandas de absorção numa faixa de 400 cm^{-1} até 4000 cm^{-1}. MEV (TESCAN VEGA 4) para visualizar a superfície das membranas em alto nível de detalhe, verificando a formação de poros.

Resultados e Discussões

Análise da umidade Após a secagem da celulose em estufa, foi obtido uma média de redução de 98% em peso da celulose seca em relação a celulose úmida após a purificação do SCOBY. Adotou-se que a celulose seca como 2% do peso do SCOBY purificado, e esse dado foi usado como base de cálculo das proporções em peso da

celulose e dos outros aditivos da membrana final. Membrana com celulose hornificada prensada a quente No contexto deste trabalho, propõe-se que a hornificação atue de forma sinérgica com a prensagem a quente em uma espécie de "sinterização" da celulose (semelhante às membranas cerâmicas) pela criação de novas ligações por efeito da hornificação e colapsagem das nanofibras, com o intuito de fazer as fibras se unirem novamente. É esperado que ao utilizar CB úmida e triturada, os sítios hidrofílicos e a reatividade das fibras fragmentadas são preservados, além de promover uma maior área superficial de contato, aumentando a interação da celulose com os aditivos. Quando a celulose é submetida à pressão, ocorre a expulsão do ar intersticial e a compactação mecânica, estabelecendo um contato íntimo entre as partículas de celulose e com a ação da temperatura, a água remanescente é removida, disparando o processo de hornificação nas interfaces de contato entre os fragmentos e ativando as reações de reticulação. A celulose purificada, seca na estufa da análise da umidade, apresentou uma coloração escurecida, com tons de marrom e laranja. Além disso, sua textura e rigidez eram semelhantes à um papel plastificado, o que tornou muito difícil a redução do seu tamanho e a obtenção do pó de celulose. O objetivo foi obter uma partícula de celulose pequena o suficiente para a prensagem e criação de uma membrana homogênea. A moagem da celulose não se mostrou eficiente nas condições avaliadas. Mesmo após o tratamento criogênico com nitrogênio líquido, o material apresentou elevada flexibilidade e resistência à fragmentação, dificultando a obtenção de partículas de menor tamanho. Esse comportamento pode estar associado ao fenômeno de hornificação, caracterizado pelo colapso irreversível da estrutura fibrilar durante os ciclos de secagem, resultando na redução da capacidade de intumescimento e no aumento das interações interfibrilares. Dessa forma, para a etapa de prensagem a quente, a celulose foi submetida à redução granulométrica manual por meio de corte com tesoura, obtendo-se fragmentos menores que favoreceram o aumento da área superficial disponível e, consequentemente, uma interação mais eficiente com os agentes reticulantes. Após a prensagem a quente com reticulação, foi obtida a membrana em formato de disco como exibida na Figura 12. O resultado final foi uma membrana de partículas sólidas em formato de disco, com textura irregular. Quando imersa em água, a membrana começou a se despedaçar, perdendo sua estrutura completamente após alguns minutos, como exibido na Figura 13. Figura 12: Membrana hornificada prensada com reticulação. Fonte: Autor, 2026. Figura 13: Membrana hornificada imersa em água. Fonte: Autor, 2026. Esse comportamento pode ter ocorrido pelo fato do PVA e do ácido cítrico não terem sido dispersos homogeneamente na matriz e/ou não tiveram acesso à CB para formar a rede reticulada. Esse resultado pode estar relacionado ao fenômeno de hornificação descrito por Du et al. (2025) e Sjöstrand et al. (2024), em que as fibras de celulose se colapsam de irreversível por causa da evaporação da água na secagem em estufa, reduzindo a acessibilidade dos grupos hidroxila para a reação de reticulação. Um método alternativo de secagem da celulose seria o liofilizador que retiraria a água por sublimação a vácuo, eliminando as forças capilares responsáveis pelo colapso das nanofibras de celulose. Outra forma de secagem que pode ser verificada é a secagem por troca de solvente (como o etanol) a fim de obter a celulose seca, preservando a integridade da estrutura das fibras. Membranas prensadas a quente e trituradas por via úmida Foi implementada a trituração da celulose antes da secagem para aumentar a área superficial de contato da celulose e promover uma melhor interação a nível molecular dos aditivos com a celulose. A trituração pode reduzir a densidade da rede tridimensional de nanofibras e ajuda a desprender a água e resíduos entre as fibras, facilitando sua remoção por filtração a vácuo. Além disso, a filtração a vácuo contribui para remover o excesso de água e resíduos. Filtrou-se

quantidades pequenas por vez até que a celulose ficasse relativamente seca raspando e movendo a celulose no papel filtro para não obstruí-lo, como exibido na Figura 14. Figura 14: Filtração a vácuo da amostra de CB triturada. Fonte: Autor, 2026. Prensar a membrana úmida faz com que os aditivos dissolvidos sejam expulsos na prensagem pelas frestas do molde, comprometendo a proporção em massa entre eles. Por esse motivo, deve-se utilizar o menor volume possível de água para a solução contendo os aditivos que serão adicionados na pasta de celulose seca. Síntese da Membrana 1 (com reticulação, sem prensagem) Foi misturada a solução do PVA com ácido cítrico na pasta filtrada de celulose, em seguida, foi adicionado o NaCl, e homogeneizando. A pasta foi então espalhada numa placa circular metálica que é colocada numa placa de aquecimento, repetindo a temperatura e o tempo de reticulação da etapa anterior. Outra placa circular metálica foi utilizada como tampa para preservar a temperatura de reticulação e evitar a troca térmica com o ambiente. No decorrer do tempo, era perceptível a massa perdendo a sua umidade com a evaporação da água, lentamente perdendo volume e descolando das paredes da placa metálica. Ao fim da reticulação, notou-se o aspecto marrom avermelhado da membrana, como exibido na Figura 15. Figura 15: Membrana 1 ao final da reticulação, sem prensagem. Fonte: Autor, 2026. A membrana resultante ficou muito dura e ela grudou na placa metálica, mesmo revestindo a placa com a vaselina antes de colocar a pasta, justamente por ter uma textura áspera, a pasta deve ter se fixado nas irregularidades do metal. Foi tentado retirar depois de imergir em água, mas ela acabou rasgando e se despedaçando em partes menores. Os pedaços da membrana foram aproveitados para fazer as análises e em metodologias futuras, deve-se usar uma placa metálica lisa ou o próprio molde metálico da prensagem. Síntese da Membrana 2 (sem reticulação, com prensagem) Por motivo da pasta de celulose ter uma massa predominantemente composta de água, adicionou-se uma quantidade de sal referente a massa úmida total da pasta, levando em conta a solubilidade do NaCl e a sua solubilidade (36g sal/100g água a 25° C), e não apenas para a massa final de celulose. Isso fez com que uma parte do NaCl fosse dissolvida na água da pasta, mas isso também cria uma solução saturada de sal, e os cristais de sal não-dissolvidos ficam dispersos na pasta para promover a porosidade. Foi testada a formação de membrana por prensagem a quente apenas utilizando a CB triturada e NaCl para verificar se iria formar membrana sem nenhum tipo de agente ligante. Ao fim da prensagem, notou-se que a membrana formada não alterou muito a sua coloração, mantendo o aspecto esbranquiçado da celulose purificada. Notou-se que ainda havia partes com um pouco de umidade, com textura macia, então a membrana foi levada à estufa por 48 horas para remover o resíduo de água que se manteve dentro do molde mesmo a temperaturas elevadas pela alta pressão dentro do molde, como exibida na Figura 16. Figura 16: Membrana 2 ao final da prensagem. Fonte: Autor, 2026. A membrana foi então seca em estufa antes de ser imersa em água para retirar o NaCl por lixiviação. Após a secagem na estufa, a membrana permaneceu com sua coloração esbranquiçada, diferente da celulose não triturada seca do primeiro teste com celulose hornificada. Durante a imersão, é possível notar a turbidez da água causada pela dissolução do sal na solução, como mostra a Figura 17. Figura 17: Membrana 2 durante a remoção do NaCl. Fonte: Autor, 2026. Ao final da lixiviação, a membrana perdeu massa em sal, criando espaços vazios no seu interior, reduzindo sua densidade, o que fez ela flutuar na superfície da água após algumas lavagens. A membrana não se desfez, apresentou um aspecto rugoso de sua estrutura. Ela foi armazenada emergida num vidro de relógio com água destilada enquanto realizava-se a síntese da Membrana 3. Ela manteve certa rigidez durante duas semanas. A partir da segunda semana imersa em água, ela começou a amolecer, ficando com uma integridade parecida à membrana do

teste seguinte após a lixiviação. É incerto o motivo pelo qual a membrana perdeu integridade estrutural depois de um longo período imersa em água, pois existem muitas possibilidades. Uma possibilidade seria a insuficiência da temperatura no interior do molde, que não causou a hornificação total da celulose, ainda contendo celulose úmida e macia na sua estrutura. Síntese da Membrana 3 (com reticulação, com prensagem) Durante o processo de prensagem e reticulação, foi verificado que a temperatura interna no molde não era semelhante à temperatura externa com o aquecimento controlado pela manta, sendo muito difícil saber se à temperatura interna chegava a temperatura de reticulação. O molde metálico é extremamente sensível a mudanças de temperatura do ambiente. Foi utilizada uma temperatura maior de aproximadamente 180-190 °C para tentar garantir que a temperatura interna atingisse 130 °C para ocorrer a reticulação por 2 horas. Figura 18: Membrana 3 ao final da reticulação, com prensagem. Fonte: Autor, 2026. Após o final da prensagem, notou-se que a membrana ficou com uma falha na sua estrutura como exibido na Figura 18 acima. O restante de sua estrutura é irregular, partes com uma coloração mais esbranquiçada e outras com coloração bege e textura uniforme, provavelmente resultante da reticulação. Ao imergir em água, ela lentamente começou a se desfazer. Uma possível explicação seria que a reticulação foi insuficiente, ou a própria finura da membrana é relevante, já depois que o NaCl saiu, imperfeições na estrutura são mais relevantes e criam instabilidades, resultando na sua quebra. Sua estrutura ficou mais frágil que a do teste com reticulação e sem prensagem, como exibida na Figura 19. Figura 19: Membranas 2 e 3 após a remoção do NaCl por imersão em água. Fonte: Autor, 2026. Análises e caracterizações Devido a fragilidade das membranas obtidas, não foi possível fazer as análises e caracterizações a respeito das suas propriedades de transporte como permeabilidade hidráulica e rejeição de solutos. Também não foi possível realizar outras análises por limitações de tempo e indisponibilidade de equipamentos do laboratório e de parceiros. Após a obtenção das membranas, elas foram secas na estufa a 60 °C e foram feitas análises e caracterizações dos três métodos realizados. Análise de FTIR Amostras das três membranas foram enviadas para a análise FTIR e foram exibidos os seguintes resultados descritos na Figura 20. Figura 20: Resultado das análises FTIR para as Membranas 1, 2 e 3. Fonte: Autor, 2026. Nota-se em todas as três membranas, uma banda de picos entre 400 e 600 cm^{-1} que podem estar ligadas a diversos fatores como às deformações das cadeias, mudanças no empacotamento cristalino, interações de hidrogênio e por impurezas e produtos intermediários. Além disso, é possível ver a presença do pico em aproximadamente 1640 cm^{-1} em todas as membranas. Esse pico é muito próximo da faixa onde se encontra reticulação em 1730 cm^{-1}, mas faz referência à água ou carboxilato livre (Machado et al., 2018; Nurfajriani et al., 2020). Existe um pequeno pico em aproximadamente 2360 cm^{-1} na Membrana 3 que não aparece em nenhuma outra membrana. Isso provavelmente se deu por uma ocorrência natural do CO_2 presente no ar ambiente que absorve radiação nesta região naquele momento, e deve ser considerado como um erro aleatório. Na Membrana 1, existe um pico diferencial em relação às membranas 2 e 3 em aproximadamente 1730 cm^{-1}. É uma banda de estiramento de carbonila (C=O) de éster, resultante da reticulação química dos aditivos (Dinesh et al., 2022; Machado et al., 2018). As membranas 2 e 3 não apresentaram esse pico por não possuírem agentes reticulantes na sua composição (membrana 2) ou pela falha no processo de reticulação (membrana 3), sugerindo que a temperatura interna do molde metálico não atingiu a temperatura de reticulação pelo tempo determinado. Mesmo a Membrana 1 tendo um certo grau de reticulação, ela não foi suficiente para manter a integridade da membrana pela falta de contato íntimo dos reagentes que a prensagem iria promover. Na Membrana 2, a escala da absorbância foi maior (~0,6) em

relação às Membranas 1 e 3. Uma possível explicação seria que composição final da Membrana 2 é apenas celulose, tendo uma concentração de celulose muito maior por área analisada comparada as outras duas, sem outros componentes e grupos funcionais que interfiram no resultado, com picos representando quantidades altas de estiramentos de ligações C-O e C-O-C (entre ~1000 cm^{-1} e ~1200 cm^{-1}), C-H (~2900 cm^{-1}) e O-H (~3340 cm^{-1}) (Machado et al., 2018). Nas membranas 1 e 3, a celulose se encontra "diluída" por outros aditivos, com formação de outras ligações por área, e esses picos são menores. Além disso, como a Membrana 3 teve uma reticulação falha por falta de efeito da temperatura de reticulação, o PVA e o ácido cítrico permaneceram entre as fibras de celulose, impedindo que as fibras de celulose se aproximassem e se unissem umas nas outras como ocorreu de forma mais eficiente na membrana 2. Durante a lixiviação, parte do PVA não reagido pode ter inchado ou sido carregado pela água, deixando microporos e defeitos na estrutura, resultando num filme rugoso, menos denso e com falhas. No FTIR, esse material não assenta bem no cristal, e o feixe de luz passa por espaços vazios, derrubando a absorbância de volta para ~0,15. Análise de MEV É possível notar eventuais áreas brancas nas imagens, se dão por "queimaduras" efetuadas pelos feixes de elétrons na matéria orgânica durante a análise. Com isso, a Figura 21 mostra a comparação da análise de MEV entre as três membranas. Figura 21: Resultado da análise MEV para as membranas 1, 2 e 3. Fonte: Autor, 2026. A análise morfológica mostrou como as variáveis de processamento (compactação mecânica e presença de aditivos) afetam a superfície das membranas sintetizadas. A eficácia do método de lixiviação de partículas (salt leaching) foi qualitativamente confirmada pela presença generalizada de poros e cavidades dispersas em todas as três membranas, decorrentes da remoção do NaCl. A Membrana 1 apresenta poros menores comparados aos das membranas 2 e 3, possivelmente sendo resultado da prensagem e como o aquecimento acontece em relação a membrana 1. A remoção da água intersticial sob aquecimento sem prensagem uniaxial induziu a contração tridimensional desordenada da celulose que promoveu uma aproximação das nanofibras, restringindo o espaço disponível para a acomodação do NaCl, resultando em uma porosidade de menor diâmetro aparente e a elevada rugosidade superficial observada na membrana 1. O aquecimento acelerou a hornificação da celulose de forma livre, induzindo o colapso irreversível das fibras e a formação de ligações de hidrogênio fortes em direções aleatórias e por isso, as imagens mostram uma textura mais rugosa. Já as membranas 2 e 3 exibiram superfícies macroscopicamente mais lisas e uniformes, associadas a prensagem que forçou a aproximação das fibras e com poros relativamente maiores, entretanto é perceptível a presença de defeitos estruturais, descontinuidades e microfraturas em regiões específicas da superfície das membranas. Sugere-se que isso é resultado da remoção dos agentes reticulantes que não reagiram na reticulação e pela insuficiência da temperatura para a hornificação completa da celulose. Isso fez com que as fibras não se unissem por completo, criando fissuras e inconsistências na estrutura.

Conclusão

O presente trabalho demonstrou a viabilidade da obtenção de membranas, um subproduto da indústria de bebidas, em membranas de CB. Através de um processo que incluiu a fermentação do chá verde, purificação química, e a síntese por prensagem a quente com aditivos, foi possível percorrer toda a cadeia de processamento, desde a obtenção do resíduo bruto até o biomaterial caracterizado. Os resultados de MEV confirmaram qualitativamente a eficácia do método SLUP, com a formação

generalizada de cavidades após a lixiviação do sal. Um dos maiores desafios técnicos enfrentados foi o fenômeno da hornificação. A tentativa inicial de processar a celulose previamente seca em estufa revelou-se inviável, pois o colapso irreversível das nanofibras resultou em um material com textura plastificada, impossível de ser moído em pó. Essa rigidez impediu que os agentes reticulantes penetrassem na estrutura da CB, levando ao desmanche da membrana em meio aquoso. A solução encontrada foi a trituração da CB por via úmida, que se mostrou um passo fundamental, pois além de aumentar a área superficial de contato para uma melhor interação molecular com os aditivos, ela também facilitou a remoção do excesso de umidade via filtração a vácuo, permitindo a obtenção de uma pasta reativa e homogênea. Apesar dos avanços, a análise de FTIR indicou que a reticulação na membrana prensada foi insuficiente devido às limitações do aparato experimental, já que a temperatura interna no molde necessária para a esterificação não foi atingida. Diante das dificuldades encontradas, abrem-se oportunidades para trabalhos futuros. Recomenda-se a exploração de métodos de secagem mais suaves, como o uso de um liofilizador, spray dry ou a técnica de troca de solvente, visando obter celulose seca que preserve a porosidade nativa e a acessibilidade dos grupos hidroxila. Adicionalmente, é necessária uma evolução no equipamento de prensagem. Sugere-se o desenvolvimento de um molde metálico sem frestas, que evite a perda de solução e aditivos durante a compressão, e que opere acoplado a uma prensa capaz de atingir pressões superiores aos 500 kgf/cm², com controle e monitoramento precisos da temperatura interna para garantir que o calor seja distribuído de forma uniforme por toda a pasta, assegurando a reticulação completa do material. Por fim, sugere-se otimizar a proporção dos ligantes utilizados, buscando a estabilidade mecânica e funcional dessas membranas visando aplicações em sistemas de filtração sustentáveis de baixo custo.

Referências

ALMEIDA, A.; SARAIVA, J.; CAVACO, G.; PORTELA, R.; & LEAL, C.; SOBRAL, R.; ALMEIDA, P. Crosslinked Bacterial Cellulose Hydrogels For Biomedical Applications. v. 177, 2022. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111438 CHO, Y. S.; KIM, B.-S.; YOU, H.-K.; CHO, Y.-S. A novel technique for scaffold fabrication: SLUP (salt leaching using powder). Current Applied Physics. Volume 14, Issue 3, Pages 371-377, 2014. https://doi.org/10.1016/j.cap.2013.12.013 DELCOLLE, Roberta. Projeto e manufatura de membranas cerâmicas via prensagem isostática para separação de emulsões óleo vegetal/água por microfiltração tangencial. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. https://doi.org/10.11606/T.18.2010.tde-17072010-102511 DINESH; WANG, H.; KIM, J. Citric Acid-Crosslinked Highly Porous Cellulose Nanofiber Foam Prepared by an Environment-Friendly and Simple Process. Global challenges (Hoboken, NJ), 6(11), 2200090, 2022. https://doi.org/10.1002/gch2.202200090 DU, M.; XIAO, Z.; LUO, Y. Sustainable strategies on cultivation, modification and rehydration of bacterial cellulose to overcome hornification for industrial applications: A review. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. Volume 9, 2025. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100736 DUFRESNE, C.; FARNWORTH E. Tea, Kombucha, and health: a review, Food Research International. v. 33, n. 6, p. 409-421, 2000. https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00067-3 GHOZALI, M.; MELIANA, Y.; CHALID, M. Synthesis and characterization of bacterial cellulose by Acetobacter

xylinum using tapioca liquid waste. Materials Today: Proceedings. v. 44, p. 2131–2134, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.274 GRAND VIEW RESEARCH. Kombucha Market Size, Share & Trends Analysis Report. 2024. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/kombucha-market HASHEMZEHI, M.; SJÖSTRAND, B.; HÅKANSSON, H.; HENRIKSSON, G. Degrees of hornification in softwood and hardwood kraft pulp during drying from different solvents. Cellulose. v. 31, p. 1813–1825, 2024. https://doi.org/10.1007/s10570-023-05657-z HUANG, S.-M.; LIU, S.-M.; TSENG, H.-Y.; CHEN, W.-C. Effect of Citric Acid on Swelling Resistance and Physicochemical Properties of Post-Crosslinked Electrospun Polyvinyl Alcohol Fibrous Membrane. Polymers. 15, 1738, 2023. https://doi.org/10.3390/polym15071738 JAYABALAN, R.; MALBAŠA, R. V.; LONČAR, E. S.; VITAS, J. S.; SATHISHKUMAR, M. A Review on Kombucha Tea—Microbiology, Composition, Fermentation, Beneficial Effects, Toxicity, and Tea Fungus. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. v. 13, n. 4, p. 538–550, 2014. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12073 JULIE M. KAPP; WALTON SUMNER. Kombucha: a systematic review of the empirical evidence of human health benefit. Annals of Epidemiology. Volume 30, Pages 66-70, 2019. https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2018.11.001 KOTCHARAT, P.; THAN-ARDNA, B.; WEDER, C.; MANUSPIYA, H. Phosphorylated Bacterial Cellulose-Poly(vinyl alcohol) Membrane for Organic Pollutant Removal. ACS Appl Mater Interfaces. 2025. https://doi.org/10.1021/acsami.5c01998 KHIN, M. N.; AHAMMED, S.; AZIZ, T.; AL-ASMARI, F.; SAMEEH, M. Y.; CUI, H.; LIN, L. Characterization of Composite Film Containing Polyvinyl Alcohol Cross-Linked With Dialdehyde Cellulose Using Citric Acid as a Catalyst for Sustainable Packaging. Packag Technol Sci. 37: 975-987, 2024. https://doi.org/10.1002/pts.2841 KHORAMABADI H. N.; AREFIAN, M.; HOJJATI , M.; TAJZAD, I.; MOKHTARZADE, A.; MAZHAR M.; JAMAVARI, A. A review of Polyvinyl alcohol / Carboxymethyl cellulose (PVA/CMC) composites for various applications. Journal of Composites and Compounds. 2(3), 69–76, 2020. https://doi.org/10.29252/jcc.2.2.2 KUMAR, V.; SHARMA, D. K.; BANSAL, V. et al. Efficient and economic process for the production of bacterial cellulose from isolated strain of Acetobacter pasteurianus of RSV-4 bacterium. Bioresource Technology. v. 275, p. 430–433, 2019. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.042 MACHADO, R. T.; MENEGUIN, A. B.; SÁBIO, R. M. et al. Komagataeibacter rhaeticus cultivated in sugarcane molasses-supplemented culture medium as a strategy to improve bacterial cellulose production. Industrial Crops and Products. v. 122, p. 637–646, 2018. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.048 MEDINA-JARAMILLO, C.; OCHOA-YEPES, O.; BERNAL, C.; FAMÁ, L. Active and smart biodegradable packaging based on starch and natural extracts. Carbohydrate Polymers. v. 176, p. 187–194, 2017. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.079 NAOMI, R.; IDRUS, R. B. H. J.; FAUZI, M. H. B. Plant-vs. bacterial-derived cellulose for wound healing: A review. International Journal of Environmental Research and Public Health. v. 17, n. 18, p. 6803, 2020. https://doi.org/10.3390/ijerph17186803 NHU, Q. V.; THAI M. L.; An N. B. N.; MINH H. T. N.; YING-CHIH L.; THUY T. T. Engineering Functional PVA: A Comprehensive Review of Chemical Modifications and Prospective Developments. ACS Polymers Au. vol. 6,1 33-60, 2025. https://doi.org/10.1021/acspolymersau.5c00133 NURFAJRIANI; PULUNGAN, N..; YUSUF, M.; TAMPUBOLON, D.; BUKIT, N. The Effects Of Sodium Hydroxide Concentrations on Synthesis Of Carboxymethyl Cellulose From Bacterial Cellulosa. Journal of Physics: Conference Series. v. 1485, n. 1, p. 012055, 2020. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1485/1/012055 OEC – OBSERVATORY OF

ECONOMIC COMPLEXITY. Petroleum, Crude: Product Trade, Exporters and Importers. 2021. https://oec.world/en/profile/hs/crude-petroleum RASTOGI, A.; BANERJEE, R. Statistical optimization of bacterial cellulose production by Leifsonia soli and its physicochemical characterization. Process Biochemistry. v. 91, p. 297–302, 2020. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.12.021 SJÖSTRAND, B.; KARLSSON, C.-A.; BARBIER, C. & HENRIKSSON, G. Hornification in commercial chemical pulps: Dependence on drying temperature. BioResources. v. 19, p. 7042-7056, 2024. https://doi.org/10.15376/biores.19.4.7042-7056 SU, J.; TAN, Q.; TANG, Q.; TONG, Z.; YANG, M. Research progress on alternative kombucha substrate transformation and the resulting active components. Frontiers in Microbiology. 2023. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1254014 VON SCHREEB, A.; SJÖSTRAND, B.; EK, M.; HENRIKSSON, G. Drying and hornification of swollen cellulose. Cellulose. v. 32, p. 5179–5189, 2025. https://doi.org/10.1007/s10570-024-06352-3 YIM, S. M.; SONG, J. E.; KIM, H. R. Production and characterization of bacterial cellulose fabrics by tea nitrogen source and sugar carbon source. Process Biochemistry. v. 59, p. 26–36, 2017. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.07.001

Anexos



Figura 9



Figura 10



Figura 11



Figura 12



Figura 13



Figura 14



Figura 15



Figura 16



Figura 17



Figura 18



Figura 19



Figura 20



Figura 21

CÓDIGO: SB0270

AUTOR: AMANDA DIAS SILVA MACEDO

ORIENTADOR: MARCIA REGINA DA SILVA PEDRINI

TÍTULO: Desenvolvimento de Kombucha Tropical de Maracujá: Valorização de Frutas e Resíduos Agroindustriais na Produção de Bebidas Funcionais

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma kombucha tropical de maracujá (Passiflora edulis) com enfoque na valorização de frutas e no aproveitamento de resíduos agroindustriais, visando à produção de uma bebida funcional alinhada aos princípios de sustentabilidade. A proposta buscou agregar valor à cadeia produtiva do maracujá, estimulando o uso integral da matéria-prima e reduzindo desperdícios provenientes do processamento agroindustrial.

A bebida foi elaborada a partir de infusão de chá verde adoçado, fermentada com cultura simbiótica de bactérias e leveduras (SCOBY), seguida da adição de polpa de maracujá e segunda fermentação. O desenvolvimento da formulação considerou o potencial bioativo da fruta e sua relevância econômica regional. Para a caracterização do produto, foram realizadas análises físico-químicas (pH, sólidos solúveis e acidez total) e determinação de compostos fenólicos totais.

Os resultados evidenciaram que a incorporação do maracujá contribuiu para o aumento do potencial antioxidante e para a obtenção de uma bebida com características sensoriais e tecnológicas adequadas. O estudo demonstra que a utilização de frutas e resíduos agroindustriais na produção de kombucha representa uma estratégia promissora para o desenvolvimento de bebidas funcionais com identidade regional, valor agregado e impacto sustentável.

Palavras-chave: kombucha; maracujá; resíduos agroindustriais; bebida funcional.

TITLE: Development of Tropical Passion Fruit Kombucha: Valorization of Fruits and Agro-Industrial Residues in the Production of Functional Beverages

Abstract

This study aimed to develop a tropical passion fruit (Passiflora edulis) kombucha, focusing on the valorization of fruits and the use of agro-industrial waste, with the goal of producing a functional beverage aligned with sustainability principles. The proposal sought to add value to the passion fruit production chain, encouraging the integral use of the raw material and reducing waste from agro-industrial processing.

The beverage was made from an infusion of sweetened green tea, fermented with a symbiotic culture of bacteria and yeasts (SCOBY), followed by the addition of passion fruit pulp and a second fermentation. The development of the formulation considered the bioactive potential of the fruit and its regional economic relevance. For product characterization, physicochemical analyses (pH, soluble solids, and total acidity), determination of total phenolic compounds. The study demonstrates that the use of fruits and agro-industrial waste in kombucha production represents a promising strategy for the development of functional beverages with regional identity, added value, and sustainable impact.

Keywords: kombucha; passion fruit; agro-industrial residues; functional beverage

Introdução

A crescente demanda por alimentos e bebidas que associem benefícios à saúde, sustentabilidade e inovação tem impulsionado o desenvolvimento de produtos funcionais obtidos a partir de processos biotecnológicos. Nesse contexto, a kombucha destaca-se como uma bebida fermentada produzida pela ação de uma cultura simbiótica de bactérias e leveduras (SCOBY) sobre uma infusão adoçada de chá, resultando em um produto rico em compostos bioativos, ácidos orgânicos e substâncias com potencial antioxidante.

Paralelamente, a valorização de frutas tropicais e o aproveitamento de resíduos agroindustriais têm recebido atenção crescente da indústria alimentícia e da comunidade científica. O Brasil é um dos principais produtores de maracujá (Passiflora edulis), fruta amplamente apreciada por suas características sensoriais e por seu conteúdo de compostos bioativos, como vitamina C, carotenoides e compostos fenólicos. Entretanto, o processamento dessa matéria-prima gera quantidades significativas de resíduos, que frequentemente são subutilizados, representando perdas econômicas e impactos ambientais.

A utilização do maracujá e de seus subprodutos na elaboração de bebidas fermentadas constitui uma alternativa promissora para agregar valor à cadeia produtiva, promover o aproveitamento integral dos recursos e desenvolver produtos alinhados aos princípios da economia circular. Além disso, a incorporação de ingredientes de origem regional pode contribuir para o enriquecimento nutricional e funcional da kombucha, ampliando sua aceitação pelo consumidor.

Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma kombucha tropical à base de maracujá e avaliar suas características físico-químicas, microbiológicas e antioxidantes, buscando contribuir para a valorização de frutas e resíduos agroindustriais na produção de bebidas funcionais sustentáveis.

Metodologia

1. Elaboração da kombucha

A kombucha foi preparada utilizando infusão de chá verde adoçada com sacarose e inoculada com cultura simbiótica de bactérias e leveduras (SCOBY). A fermentação primária ocorreu durante quatro dias. Após esse período, foi adicionada polpa de maracujá na proporção de 15% (45 mL para 300 mL de kombucha), seguida de segunda fermentação durante 48 horas a 28 °C. A kombucha elaborada apenas com chá verde foi utilizada como controle.

2. Análises físico-químicas.

3. Determinação dos compostos fenólicos totais

O teor de compostos fenólicos totais foi determinado pelo método de Folin-Ciocalteu utilizando ácido gálico como padrão. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro e os resultados expressos em mg equivalentes de ácido gálico por litro (mg GAE/L).

Resultados e Discussões

1. Potencial hidrogeniônico (pH)

A kombucha elaborada com polpa de maracujá apresentou pH médio de 3,52, inferior ao controle (3,96). A redução do pH evidencia a produção de ácidos orgânicos durante a fermentação e a contribuição da polpa de maracujá para a acidificação da bebida.

Valores inferiores a 4,0 são característicos de kombuchas e contribuem para a estabilidade microbiológica, dificultando o desenvolvimento de microrganismos deteriorantes.

Tabela 1- Valores médios de pH das amostras de kombucha controle e kombucha elaborada com polpa de maracujá.

Amostra

pH

Kombucha de chá verde

3,96 ± 0,01[a]

Kombucha de maracujá

3,52 ± 0,36[b]

2. Sólidos solúveis totais

O teor médio de sólidos solúveis foi de 8,28 °Brix para a kombucha de maracujá, enquanto a bebida controle apresentou 8,04 °Brix. Esse aumento pode ser explicado pela incorporação de açúcares naturais e outros compostos solúveis provenientes da polpa de maracujá.

Tabela 2- Valores médios de sólidos solúveis totais (°Brix) das amostras de kombucha controle e kombucha elaborada com polpa de maracujá.

Amostra

Sólidos solúveis (°Brix)

Kombucha de chá verde (Controle)

8,04

Kombucha de maracujá

8,28

3. Acidez titulável

A kombucha apresentou acidez titulável de 0,198 g de ácido acético/L, resultado compatível com a produção de ácidos orgânicos durante o processo fermentativo. A presença desses compostos contribui para o sabor ácido característico da bebida e para sua estabilidade microbiológica.

Tabela 3- Acidez titulável da kombucha elaborada com polpa de maracujá.

Amostra

Acidez titulável (g ácido acético/L)

Kombucha de maracujá

0,198

Acidez titulável da kombucha de maracujá: 0,198 g ácido acético/L

4. Compostos fenólicos

O teor de compostos fenólicos totais foi determinado pelo método de Folin-Ciocalteu, utilizando ácido gálico como padrão. A curva de calibração apresentou excelente linearidade, com equação y = 0,002998x + 0,00195 e coeficiente de determinação R^2 = 0,9999 , indicando elevada confiabilidade do método analítico para a quantificação dos compostos fenólicos.

Tabela 4- Teor de compostos fenólicos totais da kombucha controle e da kombucha elaborada com polpa de maracujá.

Amostra

Compostos fenólicos (mg GAE/L)

Kombucha de chá verde (Controle)

49,16 ± 1,01

Kombucha elaborada com polpa de maracujá

69,74 ± 1,21

Conclusão

A elaboração de kombucha utilizando polpa de maracujá mostrou-se tecnicamente viável e resultou em uma bebida com características físico-químicas adequadas.

A adição da polpa promoveu redução do pH, discreto aumento dos sólidos solúveis e incremento significativo do teor de compostos fenólicos totais em comparação ao controle.

Os resultados demonstram o potencial da utilização do maracujá na produção de kombuchas com maior valor agregado e propriedades funcionais, contribuindo para o desenvolvimento de novas bebidas fermentadas e para a valorização de frutas tropicais brasileiras.

Referências

AOAC. Official Methods of Analysis. 21. ed. Gaithersburg: AOAC International, 2019.BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT - Food Science and Technology, 1995.

DE MIRANDA, J. F. et al. Kombucha: A review of substrates, regulation, composition and biological properties. Journal of Food Science, 2022.

FUJITA, A. et al. Folin-Ciocalteu method adapted for total phenolic compounds determination. 2013.

SANWAL, S. K. et al. Kombucha: microbiology, fermentation and health benefits. 2023.

VILLARREAL-SOTO, S. A. et al. Understanding kombucha tea fermentation: a review. Journal of Food Science, 2018.

DA SILVA, S. F.; CAVALCANTE, M. P.; SENSHENG, Y.; SILVA, S. S.; FROTA GABAN, S. V. Physicochemical properties, antioxidant activity, and sensory profiles of kombucha and kombucha-like beverages prepared using passion fruit (Passiflora edulis) and apple (Malus pumila). ACS Agricultural Science & Technology, v. 4, n. 9, p. 938–946, 2024.

SILVA, Ana Paula da; OLIVEIRA, Lucas Martins de; SANTOS, Mariana Ribeiro dos. Elaboração e caracterização físico-química e sensorial de bebida fermentada tipo kombucha adicionada de polpa de maracujá (Passiflora edulis). Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial, Curitiba, v. 14, n. 2, p. 3120-3135, 2020.

FERREIRA, Camila Rodrigues; ALMEIDA, Gustavo Henrique de; SOUZA, Beatriz Lima. Avaliação do potencial antioxidante e perfil metabólico de kombucha aromatizada com suco de maracujá. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 41, n. 3, p. 589-597, 2021.

GOMES, Eduardo Vinícius; ROCHA, Patricia Nogueira. Estabilidade de compostos fenólicos e aceitabilidade sensorial de kombuchas de maracujá durante o armazenamento refrigerado. Revista de Agroecologia e Alimentos Funcionais, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 45-58, 2022.

JAYABALAN, Rasu et al. A review on kombucha tea—microbiology, composition, fermentation, beneficial effects, toxicity, and tea fungus. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, Chicago, v. 13, n. 4, p. 538-550, 2014.

CÓDIGO: SB0328

AUTOR: ALANNA ACUCENA DE SOUZA BATISTA

ORIENTADOR: BEATRIZ DE CASSIA MARTINS SALOMAO

TÍTULO: Qualidade Microbiológica de Alimentos: Riscos e Implicações para a Saúde Pública

Resumo

O presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade microbiológica de amostras de alface, queijo coalho e carne de frango comercializadas no município de Natal, Rio Grande do Norte, considerando microrganismos indicadores de condições higiênico-sanitárias e de interesse para a saúde pública. As análises foram realizadas no Laboratório de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, seguindo metodologias microbiológicas descritas na literatura especializada. Para a alface, foram determinados coliformes totais e termotolerantes pelo método do Número Mais Provável (NMP), seguido do isolamento em ágar Eosina Azul de Metileno (EMB) para investigação de Escherichia coli. Foram observadas combinações positivas de 3-3-3 para coliformes totais, o que corresponde a uma contagem superior a 1,1× 103 NMP/g e 3-2-1 para coliformes termotolerantes, correspondendo a 1,5× 10^2 NMP/g, além da presença de colônias com brilho verde-metálico características de E. coli. Na amostra de queijo, a contagem em meio seletivo para Staphylococcus aureus apresentou 25 colônias na diluição 10^{-1}, correspondendo a 2,5 × 10^2 UFC/g. Na amostra de frango, foram observadas 37 colônias características em meio seletivo associado à investigação de Enterobacteriaceae, resultando em 3,7 × 10^2 UFC/g. Os resultados evidenciam a ocorrência de microrganismos indicadores e reforçam a importância do controle higiênico-sanitário durante a produção, manipulação e comercialização de alimentos.

Palavras-chave: Microbiologia. Alimentos. Contaminação. Segurança alimentar.

TITLE: Microbiological Quality of Foods: Risks and for Implications Public Health

Abstract

The present study aimed to evaluate the microbiological quality of samples of lettuce, coalho cheese, and chicken meat marketed in the municipality of Natal, Rio Grande do Norte, considering microorganisms that indicate hygienic-sanitary conditions and are of public health concern. The analyses were carried out at the Food Engineering Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Norte, following microbiological methodologies described in the specialized literature. For the lettuce, total and thermotolerant coliforms were determined using the Most Probable Number (MPN) method, followed by isolation on Eosin Methylene Blue (EMB) agar to investigate the presence of Escherichia coli. Positive combinations of 3-3-3 were observed for total coliforms, corresponding to a count higher than 1.1×10^3 MPN/g, and 3-2-1 for thermotolerant coliforms, corresponding to 1.5×10^2 MPN/g, in addition to the presence of colonies with a characteristic metallic-green sheen of E. coli. In the cheese sample, enumeration on a selective medium for Staphylococcus aureus showed 25 colonies at the 10^{-1} dilution, corresponding to 2.5×10^2 CFU/g. In the chicken sample, 37 characteristic colonies were observed on a selective medium associated with the investigation of Enterobacteriaceae, resulting in 3.7×10^2 CFU/g. The results demonstrate the occurrence of indicator microorganisms and reinforce the importance of hygienic-sanitary control during the production, handling, and marketing of food.

Keywords: Microbiology. Food. Contamination. Food safety.

Introdução

A qualidade microbiológica dos alimentos está diretamente relacionada à proteção da saúde dos consumidores, uma vez que a presença de microrganismos patogênicos ou de indicadores de condições inadequadas de higiene pode representar um risco à saúde pública. As doenças transmitidas por alimentos (DTA) podem ocorrer quando produtos contaminados são consumidos, sendo a contaminação possível em diferentes momentos da cadeia produtiva, incluindo produção, processamento, transporte, armazenamento, comercialização e manipulação. Dessa forma, o controle microbiológico constitui uma importante ferramenta para avaliar as condições higiênico-sanitárias dos alimentos (OLAMAIT; HOLLEY, 2012).

Entre os alimentos que merecem atenção estão as hortaliças consumidas sem cocção, como a alface (Lactuca sativa L.). Por ser frequentemente consumida crua, a alface pode apresentar contaminação microbiológica proveniente do solo, da água de irrigação, de manipuladores, de superfícies ou das condições de transporte e comercialização. Nesse contexto, a investigação de coliformes totais e termotolerantes permite avaliar possíveis condições inadequadas de higiene, enquanto a identificação de Escherichia coli pode indicar contaminação de origem fecal. A qualidade microbiológica da água utilizada no cultivo também pode influenciar diretamente a segurança desses vegetais (SILVA et al., 2016).

A carne de frango constitui outra matriz de interesse, considerando sua ampla utilização na alimentação e a possibilidade de contaminação ao longo da cadeia de produção e comercialização. Durante etapas como abate, processamento, armazenamento e manipulação, podem ocorrer condições favoráveis à disseminação de microrganismos.

Entre os agentes de importância microbiológica associados a esse alimento estão Salmonella spp. e bactérias da família Enterobacteriaceae, cuja presença pode estar relacionada a falhas nas condições higiênico-sanitárias (MENDES, 2022).

Da mesma forma, o queijo coalho apresenta relevância para a avaliação da segurança microbiológica, especialmente por sua importância na alimentação e na cultura da região Nordeste. Problemas relacionados à qualidade da matéria-prima, ao processamento, à manipulação ou às condições de comercialização podem favorecer a presença de microrganismos. Nesse sentido, Staphylococcus aureus constitui um importante indicador a ser investigado, pois sua ocorrência em alimentos pode estar associada à contaminação durante a manipulação e representar risco ao consumidor (JESUS, 2023).

Diante da importância do controle microbiológico para a segurança dos alimentos, a análise de produtos comercializados diretamente ao consumidor permite identificar possíveis condições de contaminação e contribuir para a avaliação dos riscos associados ao seu consumo. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade microbiológica de amostras de alface, carne de frango e queijo coalho comercializadas no município de Natal, Rio Grande do Norte, por meio da investigação de microrganismos indicadores e de interesse para a saúde pública.

Metodologia

O estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a qualidade microbiológica de alimentos comercializados no município de Natal, Rio Grande do Norte, tendo como matrizes alimentares alface (Lactuca sativa), queijo coalho e carne de frango. As análises microbiológicas foram realizadas no Laboratório de Microbiologia de Alimentos do curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), utilizando procedimentos baseados nas metodologias descritas por Silva et al. (2017).

Para o preparo das amostras, foram pesados assepticamente 25 g de cada alimento e adicionados a 225 mL de água peptonada tamponada estéril a 0,1%, obtendo-se a diluição inicial. As amostras foram homogeneizadas e, posteriormente, foram realizadas diluições decimais seriadas de acordo com a necessidade das análises microbiológicas.

A determinação de coliformes totais e termotolerantes foi realizada pela técnica do Número Mais Provável (NMP), utilizando séries de tubos contendo meios de cultura específicos. Para o teste presuntivo de coliformes, foram utilizados Caldo Lauril Sulfato Triptose (LST), com posterior confirmação em Caldo Verde Brilhante Bile 2% (VB). Os tubos foram incubados a aproximadamente 35 °C e avaliados quanto ao crescimento microbiano e à formação de gás nos tubos de Durham. Para a confirmação de coliformes termotolerantes, culturas provenientes dos tubos positivos foram inoculadas em Caldo EC e incubadas a 44,5 °C por aproximadamente 24 horas, sendo considerados positivos os tubos que apresentaram crescimento e produção de gás.

A investigação de Escherichia coli foi realizada a partir dos tubos positivos de Caldo EC, mediante repicagem por esgotamento em ágar Eosina Azul de Metileno (EMB). Após incubação, foram avaliadas as características morfológicas das colônias, considerando-se como indicativas de E. coli aquelas que apresentaram coloração escura e brilho verde-metálico característico.

Para a amostra de queijo coalho, foi realizada contagem em meio seletivo destinado à investigação de Staphylococcus aureus. As placas foram avaliadas após o período de incubação e as colônias características foram contabilizadas. A concentração foi calculada considerando o número de colônias obtido e o fator de diluição, sendo expressa em UFC/g.

Na amostra de carne de frango, foi realizada contagem em meio seletivo associado à investigação de Enterobacteriaceae. As placas foram avaliadas quanto à presença de colônias características e a concentração foi calculada a partir da diluição que apresentou contagem adequada, sendo expressa em UFC/g. Os resultados obtidos foram organizados e interpretados de acordo com os procedimentos microbiológicos empregados e confrontados com informações disponíveis na literatura sobre a qualidade higiênico-sanitária dos alimentos analisados.

Resultados e Discussões

A avaliação microbiológica das amostras demonstrou a ocorrência de microrganismos indicadores de condições higiênico-sanitárias inadequadas nos alimentos analisados. Os resultados obtidos para a alface foram determinados principalmente por meio da técnica do Número Mais Provável (NMP), enquanto as amostras de queijo e frango foram avaliadas por contagem em placas em meios seletivos, sendo apresentados na Tabela 1.

Na amostra de alface, a análise presuntiva de coliformes totais apresentou combinação 3-3-3, indicando resultados positivos nas três diluições avaliadas (10^{-1}, 10^{-2} e 10^{-3}). A ocorrência de crescimento e formação de gás nos tubos de Durham demonstram a presença de microrganismos pertencentes ao grupo dos coliformes. Esse grupo é utilizado como indicador das condições higiênico-sanitárias dos alimentos, uma vez que sua ocorrência pode estar relacionada a falhas durante o cultivo, processamento, manipulação ou comercialização.

Para os coliformes termotolerantes, foi observada a combinação 3-2-1 nas diluições 10^{-1}, 10^{-2} e 10^{-3}, respectivamente. A presença desses microrganismos possui maior relevância sanitária quando comparada à detecção de coliformes totais, especialmente em alimentos consumidos crus. A alface pode apresentar maior vulnerabilidade à contaminação por ser frequentemente consumida sem tratamento térmico e por estar exposta a diferentes fontes de contaminação ao longo da cadeia produtiva. Segundo Silva et al. (2016), a qualidade microbiológica da água utilizada na irrigação constitui um importante fator relacionado à segurança de hortaliças, podendo contribuir para a introdução de microrganismos no produto.

A investigação complementar em ágar EMB apresentou crescimento de colônias com brilho verde-metálico característico, sendo interpretada como positiva para Escherichia coli. Também foram observadas colônias de coloração purpúrea ou rosada sem brilho metálico, compatíveis com outros microrganismos do grupo dos coliformes. A detecção de E. coli em uma hortaliça consumida crua é um achado relevante sob o ponto de vista higiênico-sanitário, pois esse microrganismo é utilizado como indicador de contaminação de origem fecal. Além disso, a presença de bactérias indicadoras pode refletir condições inadequadas de higiene ou contaminação em etapas anteriores à chegada do alimento ao consumidor.

Resultados dessa natureza são compatíveis com a preocupação descrita na literatura quanto à qualidade microbiológica de hortaliças consumidas in natura. Candido et al. (2024) destacaram a ocorrência de contaminação bacteriana em amostras de alface comercializadas, reforçando a necessidade de medidas adequadas de higiene e sanitização. A contaminação de vegetais pode ocorrer por meio da água, do solo, de equipamentos, superfícies, manipuladores e condições inadequadas de transporte e comercialização. A confirmação de Escherichia coli na amostra de alface também é corroborado por Oliveira (2021), que, ao analisar o perfil bacteriano de surtos de Doenças Transmitidas por Alimentos na região Nordeste, identificou a E. coli como o principal agente bacteriano isolado, estando associada a 62% dos surtos bacterianos confirmados no ano de 2019. Isso evidencia que a contaminação por coliformes e E. coli é um problema persistente e de expressiva relevância para a saúde pública na região.

Na amostra de queijo coalho, a contagem realizada em meio seletivo para Staphylococcus aureus apresentou 25 colônias na diluição 10^{-1}, correspondendo a uma concentração estimada de $2,5 \times 10^{2}$ UFC/g. A presença de S. aureus em alimentos pode estar associada principalmente à manipulação inadequada, considerando que essa bactéria pode estar presente na microbiota da pele e das mucosas de seres humanos. Assim, sua ocorrência pode indicar falhas nas condições de higiene durante a fabricação, manipulação ou comercialização do produto.

O resultado observado no queijo apresenta relevância devido às características do alimento e às condições em que pode ser produzido e comercializado. Jesus (2023), ao avaliar queijo coalho comercializado em feira livre, destacou a importância do controle das condições higiênico-sanitárias para reduzir a ocorrência de microrganismos potencialmente associados à contaminação do produto. Dados epidemiológicos relacionados à região Nordeste apontam o S. aureus como o segundo agente bacteriano de maior prevalência em surtos de DTA no Nordeste (14% dos casos identificados), com grande parte dos episódios ocorrendo no ambiente domiciliar (60%), onde o consumo de laticínios artesanais sem tratamento térmico prévio é frequente (OLIVEIRA, 2021). Dessa forma, a detecção de S. aureus na amostra analisada reforça a necessidade de atenção às boas práticas de fabricação e manipulação durante toda a cadeia produtiva.

Para a amostra de carne de frango, foram observadas 37 colônias características na diluição 10^{-1} em meio seletivo associado à investigação de Enterobacteriaceae, resultando em uma concentração estimada de $3,7 \times 10^{2}$ UFC/g. A detecção de Enterobacteriaceae na carne de frango corrobora as observações de Mendes (2022), que destacou a elevada suscetibilidade dos cortes de aves à contaminação por patógenos e microrganismos indicadores quando expostos a condições inadequadas de conservação

e manipulação no comércio varejista. Esses achados ressaltam a importância da adoção de rigorosas condições higiênico-sanitárias durante a comercialização, tais como a manutenção da cadeia do frio mediante refrigeração adequada, o manuseio higiênico dos cortes e a prevenção da contaminação cruzada nos pontos de venda para garantir a segurança microbiológica do produto.

De maneira geral, os resultados obtidos demonstram a presença de indicadores microbiológicos relevantes nas três matrizes analisadas. A identificação de coliformes termotolerantes e E. coli na alface, a contagem de S. aureus no queijo coalho e o crescimento observado na amostra de frango indicam a necessidade de manutenção de práticas adequadas de higiene, manipulação, armazenamento e comercialização. Esses cuidados são fundamentais para reduzir a possibilidade de contaminação dos alimentos e, consequentemente, os riscos relacionados às doenças transmitidas por alimentos.

Os achados reforçam, portanto, a importância do monitoramento microbiológico de alimentos comercializados e da adoção de boas práticas ao longo da cadeia produtiva. Além de contribuir para a avaliação da qualidade dos produtos, esse tipo de investigação pode fornecer informações relevantes para ações de educação sanitária e prevenção de riscos à saúde dos consumidores.

Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram a ocorrência de indicadores microbiológicos relevantes nas amostras de alimentos analisadas. Na alface, foram identificados coliformes totais e termotolerantes, além da confirmação de Escherichia coli por isolamento em ágar EMB, evidenciando condições que merecem atenção quanto à qualidade higiênico-sanitária do produto.

No queijo coalho, foi observada contagem de $2{,}5 \times 10^2$ UFC/g de Staphylococcus aureus, enquanto a amostra de frango apresentou $3{,}7 \times 10^2$ UFC/g associado à investigação de Enterobacteriaceae. Esses resultados reforçam a importância do controle das condições de higiene, manipulação, processamento, armazenamento e comercialização dos alimentos.

A pesquisa contribui para o conhecimento da qualidade microbiológica dos alimentos avaliados e evidencia a necessidade de monitoramento contínuo e adoção de boas práticas, visando reduzir possíveis riscos à saúde dos consumidores. Estudos posteriores, com maior número de amostras e análises confirmatórias, poderão ampliar a avaliação da qualidade microbiológica dos alimentos comercializados no município de Natal, Rio Grande do Norte.

Referências

CANDIDO, A. L. C. et al. Avaliação da qualidade microbiológica de alfaces comercializadas em supermercados em uma cidade do interior do estado de São Paulo. Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2024.

JESUS, É. V. O. Qualidade microbiológica de queijo coalho adquiridos em feira livre no município de Maceió-AL. 2023. 30 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Zootecnia) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2023.

MENDES, S. M. C. Avaliação higiênico-sanitária de cortes de frango (Gallus gallus domesticus) comercializados em feiras livres do município do Rio de Janeiro. 2022. 81 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Vigilância Sanitária) – Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2022.

OLAMAIT, N. A.; HOLLEY, R. A. Factors influencing the microbial safety of fresh produce: a review. Food Microbiology, Amsterdam, v. 32, n. 1, p. 1-19, 2012.

OLIVEIRA, F. S. Análise epidemiológica do perfil bacteriano envolvido nas Doenças Transmitidas por Alimentos (DTA), na região Nordeste do Brasil para o ano de 2019. Research, Society and Development, v. 10, n. 11, e428101119855, 2021. DOI:http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19855.

SILVA, A. F. S. et al. Análise bacteriológica das águas de irrigação de horticulturas. Revista Ambiente & Água, Taubaté, v. 11, n. 2, p. 428-438, 2016.

SILVA, N. da; JUNQUEIRA, V. C. A.; SILVEIRA, N. F. A.; TANIWAKI, M. H.; GOMES, R. A. R. Manual de métodos de análise microbiológica de alimentos e água. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2017

Anexos



Tabela de resultados

CÓDIGO: SB0842

AUTOR: JUDSON CÉSAR ALVES DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: ROBERTA TARGINO HOSKIN

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE INGREDIENTE ALIMENTÍCIO EM PÓ A PARTIR DO RESÍDUO DE CAMARÕES Penaeus vannamei

Resumo

A geração de subprodutos no processamento de camarão representa um desafio ambiental e, simultaneamente, uma oportunidade para a recuperação de compostos de interesse. Este estudo teve como objetivo desenvolver ingrediente alimentício em pó rico em carotenóides (IRC) utilizando quitosana recuperada do resíduo de Penaeus vannamei. O resíduo foi usado para a extração de quitina e obtenção de quitosana. Os carotenoides foram extraídos em óleo de soja (ORC) e incorporados a emulsão contendo maltodextrina e quitosana, posteriormente submetida à secagem em estufa de circulação de ar. Os materiais obtidos foram caracterizados por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier, umidade, atividade de água, rendimento de secagem e atividade antioxidante pelos métodos ABTS e DPPH. A quitosana apresentou 5,77 ± 0,25% de umidade, enquanto os espectros de infravermelho indicaram material parcialmente desacetilado. A secagem teve alto rendimento (96,74 ± 0,29%) e o IRC apresentou umidade de 4,23 ± 0,07% e atividade de água de 0,311 ± 0,007. A atividade antioxidante foi superior no ORC em relação ao IRC, com reduções de 46,1% e 79,0% nos ensaios ABTS e DPPH, respectivamente. Os resultados apontam para a necessidade de aprimoramento da formulação da emulsão para preservação da atividade antioxidante. Os resultados demonstram o potencial do resíduo de camarão para obtenção de biomoléculas de interesse para produzir ingredientes de maior valor agregado.

Palavras-chave: Carotenóides; Astaxantina; Emulsão; Atividade antioxidante.

TITLE: DEVELOPMENT OF A CAROTENOID-RICH FOOD INGREDIENT POWDER FROM Penaeus vannamei SHRIMP RESIDUE

Abstract

Shrimp processing by-products represent both an environmental challenge and an opportunity for the recovery of molecules of industrial interest. This study aimed to

develop a carotenoid-rich powdered food ingredient (IRC) using chitosan recovered from Penaeus vannamei shrimp residues. The shrimp residue was used for chitin extraction and subsequent chitosan production. Carotenoids were extracted with soybean oil (ORC) and emulsified with maltodextrin and chitosan, which was subsequently hot air dried in a forced-air oven. The resulting materials were characterized by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy to assess their chemical composition and functional groups, along with measurements of moisture content, water activity, drying yield, and antioxidant activity using the ABTS and DPPH assays. The recovered chitosan had a moisture content of 5.77 ± 0.25%, while the FTIR spectra indicated a partially deacetylated material. A high drying yield of 96.74 ± 0.29% was obtained, and the powdered ingredient exhibited a moisture content of 4.23 ± 0.07% and water activity of 0.311 ± 0.007. Compared with ORC, IRC exhibited 46.1% and 79.0% lower antioxidant activity in the ABTS and DPPH assays, respectively. These results suggest that further optimization of the emulsion formulation may improve the retention of antioxidant activity. Overall, the findings demonstrate the potential of shrimp residues as a source of biomolecules of industrial interest for the development of value-ad

Keywords: Carotenoids; Astaxanthin; Emulsion; Antioxidant activity.

Introdução

A carcinicultura tem apresentado expansão nas últimas décadas, impulsionada pela crescente demanda por camarão cultivado. Entre as espécies de maior relevância, Penaeus vannamei destaca-se na produção mundial e brasileira, com forte concentração da atividade na região Nordeste (FAO, 2025; Ximenes; Vidal, 2025).

No processamento, a remoção de cabeça e exoesqueleto gera quantidades expressivas de subprodutos, que podem representar de 35 a 55% da biomassa processada. Quando descartados inadequadamente, esses materiais podem contribuir para a geração de odores, emissão de gases e processos de eutrofização, além de representar perda de compostos de interesse (Fotodimas; Ioannou; Kanlis, 2024; Emadi Shaibani; Pazooki, 2026).

Além do impacto associado ao descarte, os subprodutos de camarão apresentam composição favorável à valorização. O exoesqueleto contém proteínas, minerais e quitina, além de lipídios e pigmentos (astaxantina, por exemplo), com proporções que variam conforme a espécie e a fração anatômica utilizada (Zhang et al., 2024; Gao; Tang; Zhu, 2024).

A quitina, polissacarídeo estrutural amplamente encontrada no exoesqueleto de diversos crustáceos, pode ser recuperada e convertida em quitosana por desacetilação alcalina, originando um biopolímero com propriedades de interesse para aplicações em alimentos, embalagens e outros setores (Gao; Tang; Zhu, 2024). Assim, a recuperação simultânea de diferentes frações do resíduo pode ampliar seu aproveitamento e agregar valor à biomassa.

Entre os compostos presentes na fração lipídica, destaca-se a astaxantina, carotenóide lipossolúvel de interesse para aplicações alimentícias devido à sua atividade

antioxidante. Entretanto, sua utilização é limitada pela baixa solubilidade em água e pela sensibilidade à luz, oxigênio e temperatura, fatores que podem comprometer sua estabilidade durante o processamento e armazenamento (Dang; Li; Yu, 2024).

A incorporação desse pigmento em sistemas de dispersão e encapsulação constitui estratégia para melhorar sua dispersibilidade e proteção frente às condições ambientais. Estudos recentes demonstram a viabilidade da obtenção de pós contendo astaxantina a partir de resíduos de camarão, utilizando maltodextrina e outros materiais de parede (Sharayei et al., 2024a).

Nesse contexto, a recuperação estratégica de quitina e carotenóides a partir do resíduo de P. vannamei pode ser usada para a obtenção de ingredientes de maior valor agregado. Diante disso, este estudo teve como objetivo desenvolver um ingrediente em pó rico em carotenóides a partir do resíduo de camarão, utilizando quitosana recuperada como componente da matriz, visando à valorização integrada dessa biomassa.

Metodologia

As matérias-primas e o resíduo de camarão, constituído pelo cefalotórax e segmentos do exoesqueleto abdominal, foi obtido por doação da empresa Bell Camarões (Natal/RN) e transportado sob refrigeração ao Laboratório de Compostos Bioativos (LABTA), do Complexo de Laboratórios de Engenharia de Alimentos (CLEA) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Obtenção da farinha de camarão

Os resíduos foram higienizados em solução clorada a 200 ppm por 15 min e enxaguados. Em seguida, foram secos em estufa de circulação de ar (MA 035, Marconi, Brasil) a 80 °C por 12 h, triturados em processador de alimentos (RI7761, Philips Walita, Brasil) e armazenados sob refrigeração até sua utilização.

Recuperação de quitina e obtenção de quitosana

A recuperação de quitina a partir do resíduo de P. vannamei e a obtenção de quitosana foram realizadas conforme metodologia adaptada de Silva, Oliveira e Rosa (2024). Para isso, a farinha de camarão foi submetida, sequencialmente, à desmineralização, desproteinização, descoloração e desacetilação. Ao final de cada etapa, o material foi separado em peneira mesh 32 e lavado com água destilada até pH neutro. A desmineralização foi realizada com HCl 1 M (1:10, m/v) por 6 h, à temperatura ambiente e sob agitação, seguida de desproteinização com NaOH 0,5 M (1:10, m/v) por 18 h, à temperatura ambiente e sem agitação. Posteriormente, realizou-se a descoloração com NaClO 2,5% (1:4, m/v) por 1 h, sob agitação. Após lavagem e secagem, obteve-se a quitina purificada, que foi submetida à desacetilação com NaOH 45% (1:20, m/v) a 105 °C por 4 h, sob agitação constante. Após filtração e lavagem até pH neutro, a quitosana foi seca em estufa de circulação de ar (MA 035, Marconi, Brasil) e armazenada à temperatura ambiente.

Extração de carotenóides

O óleo rico em carotenóides (ORC) foi obtido conforme metodologia adaptada de Silva et al. (2021). A farinha de resíduo de camarão foi homogeneizada em óleo de soja (1:4, m/v) e submetida à extração a 70 °C por 2 h em banho-maria (TE-056 MAG, Tecnal, Brasil). Após a extração, a mistura foi filtrada em gaze, e o óleo obtido foi armazenado sob congelamento até a utilização.

Desenvolvimento do ingrediente em pó

O ingrediente em pó rico em carotenóides (IRC) foi desenvolvido conforme metodologia adaptada de Diana et al. (2025), em duas etapas: formação da emulsão óleo em água e secagem. A emulsão foi preparada pela homogeneização de maltodextrina em solução de ácido acético a 1% (m/v), contendo quitosana a 1% (m/v), na proporção de 3:1. O óleo rico em carotenóides foi adicionado gradualmente à mistura, na proporção de 1:10, sob agitação constante, até homogeneização.

A emulsão foi distribuída em bandejas e seca em estufa de circulação de ar (MA 035, Marconi, Brasil) a 50 °C por 30 h. O material seco foi removido das bandejas, triturado em almofariz e pistilo e armazenado sob congelamento e ao abrigo da luz até a utilização.

Caracterização da quitina/quitosana

A quitina/quitosana recuperada do resíduo de camarão foi caracterizada quanto ao teor de umidade, determinado por secagem a 105 °C até massa constante (AOAC, 2005) e aos grupos funcionais superficiais por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) (Cary 630, Agilent, EUA), na faixa de 4000–600 cm^{-1}, utilizando acessório de reflectância total atenuada (ATR).

Caracterização do ORC e IRC

O rendimento de secagem do ingrediente em pó foi determinado pela razão entre o teor de sólidos das partículas após a secagem e o teor de sólidos da emulsão, conforme metodologia adaptada de Hoskin et al. (2023). O produto foi caracterizado quanto à umidade, determinada por secagem a 105 °C até massa constante (AOAC, 2005), e à atividade de água, medida em AquaLab (TE8248, Decagon Devices, EUA).

A atividade antioxidante ORC e do ingrediente em pó foi determinada pelos métodos ABTS [ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico)] e DPPH [2,2-difenil-1-picril-hidrazila], conforme metodologia adaptada de Campanha et al. (2020). As amostras foram extraídas com metanol, conforme Silva et al. (2021), nas proporções de 1:1 (m/v) para o extrato hidrofóbico e 1:2 (m/v) para o ingrediente em pó. Após homogeneização, as amostras foram submetidas a banho ultrassônico (DK-1500E, DK Sonic, China) por 10 min e centrifugadas a 1300 × g por 5 min em microcentrífuga (MOD2410, FANEM, Brasil). Os sobrenadantes foram utilizados nas análises.

Para o ensaio ABTS, a solução de ABTS•+ foi preparada com ABTS 7 mM e persulfato de potássio 140 mM e mantida ao abrigo da luz por 16 h. Posteriormente, foi diluída em etanol 95% até a absorbância de 0,700 ± 0,05 a 734 nm. A curva padrão foi preparada

com Trolox (1–100 µg/mL). Em cada poço, foram adicionados 20 µL de amostra ou padrão e 280 µL de ABTS•+. Após 6 min ao abrigo da luz, a placa foi agitada por 10–30 s e a absorbância determinada a 734 nm. Os resultados foram expressos em µg de equivalente Trolox (ET) por g de extrato.

Para o ensaio DPPH, a solução de trabalho foi preparada a partir de DPPH 0,608 mM, diluído em metanol até absorbância de 0,700 ± 0,05 a 515 nm. A curva padrão foi preparada com Trolox nas concentrações de 25–250 µg/mL. Foram adicionados 30 µL de amostra ou padrão e 270 µL da solução de DPPH em cada poço. Após 30 min ao abrigo da luz, a placa foi agitada por 10–30 s e a absorbância determinada a 515 nm. Os resultados foram expressos em µg de ET por g de extrato.

Tratamento estatístico dos dados

Os dados serão submetidos à análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey para comparação múltipla das médias, considerando-se $p < 0,05$ como nível de significância. As análises serão realizadas no OriginPro 2024, e os resultados expressos como média ± desvio padrão, com indicação das diferenças estatisticamente significativas.

Resultados e Discussões

Caracterização da quitina/quitosana

A quitina/quitosana apresentou 5,77 ± 0,25% de umidade, valor compatível com os reportados para quitosana obtida de resíduos de camarão, que variam aproximadamente de 1,25 a 8,71%. Valores inferiores a 10% são considerados adequados para quitosana comercial (Hosney; Ullah; Barčauskaitė, 2022). Resultados próximos foram observados por Chik et al. (2023), que encontraram 4,71 ± 0,26% e 4,30 ± 0,07% em quitosana extraídas de Penaeus vannamei.

Os espectros de FTIR das amostras A, B e C (Figura 01) apresentaram bandas características de quitina/quitosana, incluindo aquelas próximas a 3435 cm^{-1} (O–H/N–H), 2870 cm^{-1} (C–H), 1655 cm^{-1} (amida I: estiramento da ligação C=O do grupo acetamida) e 1550 cm^{-1} (amida II: dobramento da ligação N-H do grupo acetamida), além das vibrações associadas à cadeia polissacarídica na região de 1200–900 cm^{-1} (Ghanem et al., 2025).

Figura 01 - Espectros de FTIR da (A) quitina, (B) quitosana extraída e (C) quitosana purificada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A amostra A apresentou perfil compatível com quitina, enquanto B e C mantiveram as bandas de amida I e II, indicando a permanência de grupos acetilados após as etapas de tratamento. Esse comportamento é consistente com a literatura, que associa a região de

1650–1660 cm^{-1} à amida I e a região de aproximadamente 1550 cm^{-1} à amida II da quitina, haja vista que durante a desacetilação, espera-se a redução dessas bandas e o aumento relativo da absorção próxima a 1580–1600 cm^{-1}, atribuída aos grupos $–NH_2$ da quitosana (Ghanem et al., 2025; Chonanant et al., 2024).

A comparação entre os espectros indica que as amostras B e C não apresentaram alterações pronunciadas na região das amidas em relação à amostra A, sugerindo que a remoção dos grupos acetila foi limitada. Assim, os resultados de FTIR indicam que os materiais B e C ainda apresentam características estruturais de quitina, sendo compatíveis com um material parcialmente desacetilado.

Rendimento e caracterização do IRC

O processo de desenvolvimento do pó a partir da secagem em estufa, mostrou rendimento de 96,74 ± 0,29%. O resultado indica que a maior parte dos sólidos inicialmente submetidos ao processo foi recuperada como pó.

Em estudos recentes envolvendo a obtenção de pós contendo astaxantina de resíduos de camarão, rendimentos elevados também foram observados. Sharayei et al. (2024b) mostraram 94,6% de rendimento de produção para microcápsulas de extrato de camarão contendo astaxantina obtidas por liofilização, enquanto a eficiência de encapsulação foi de 91,8%.

O ingrediente em pó rico em astaxantina apresentou 4,23 ± 0,07% de umidade, resultado compatível com pós de astaxantina encapsulada descritos na literatura recente. Habib et al. (2025) reportaram umidade entre 3,95 e 6,23%, enquanto Sharayei et al. (2024b) observaram valores próximos em pós obtidos a partir de extrato de casca de camarão, evidenciando que o resultado obtido está dentro de uma faixa adequada para produtos desidratados.

A atividade de água de 0,311 ± 0,007 foi próxima a faixa de 0,32–0,35 relatada para pós de astaxantina nanoencapsulada, considerada adequada para armazenamento prolongado (Habib et al., 2025). Dessa forma, a baixa umidade associada à reduzida disponibilidade de água sugere boa estabilidade físico-química e microbiológica do ingrediente, embora condições de armazenamento que evitem absorção de umidade sejam importantes para preservar a astaxantina.

Atividade Antioxidante

A atividade antioxidante ORC e do IRC, determinada pelos ensaios ABTS e DPPH, está apresentada na Tabela 01. O óleo apresentou valores significativamente superiores ao pó em ambos os métodos ($p < 0,05$), com 31,32 ± 2,87 e 16,88 ± 3,16 µg ET/g para ABTS e 74,90 ± 0,41 e 15,72 ± 2,95 µg ET/g para DPPH, respectivamente. Esses resultados correspondem a reduções de aproximadamente 46,1% no ABTS e 79,0% no DPPH após a obtenção do produto em pó. A maior atividade observada no óleo pode estar relacionada à maior disponibilidade da astaxantina na matriz lipídica (Panagiotakopoulos et al., 2023; Sharayei et al., 2024b).

Tabela 01 - Atividade antioxidante do ORC e do IRC determinada pelos ensaios ABTS e DPPH

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: Valores expressos como média ± desvio-padrão. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A redução da atividade antioxidante observada no IRC pode estar diretamente relacionada à exposição ao processo térmico empregado durante a secagem, que pode promover a degradação, transformação química ou perda de compostos antioxidantes. Além disso, a formulação do produto pode ter contribuído para a redução da atividade antioxidante por efeito de diluição dos carotenóides nos sólidos incorporados à matriz, como maltodextrina e quitosana.

Esse efeito foi mais pronunciado os resultados obtidos pelo metodo DPPH, cuja resposta pode ser influenciada pela polaridade do meio e pela interação entre o radical e a matriz da amostra, enquanto o ABTS apresenta maior versatilidade para reagir com compostos de diferentes polaridades (La; Kim; Lee, 2021). Resultados semelhantes foram observados por Sharayei et al. (2024b), que demonstraram a manutenção da atividade antioxidante em pós de astaxantina obtidos a partir de extrato de casca de camarão após encapsulação.

Conclusão

Os resultados demonstraram a viabilidade da valorização integrada do resíduo de camarão para a obtenção de ingrediente em pó rico em carotenóides. O material recuperado apresentou características de quitina parcialmente desacetilada, enquanto o processo de secagem resultou em elevado rendimento e em um pó com baixa umidade e atividade de água, indicando condições favoráveis à sua estabilidade.

Embora tenha ocorrido redução significativa da atividade antioxidante, o ingrediente em pó rico em carotenóides manteve atividade antioxidante mensurável pelos métodos ABTS e DPPH. Dessa forma, o estudo evidencia o potencial de aproveitamento do resíduo de camarão como fonte de compostos de valor agregado, contribuindo para estratégias de valorização dessa biomassa.

Estudos futuros devem ser realizados em vista a aprimorar a formulação da emulsão, para que seja possível viabilizar um ingrediente em pó com maior atividade antioxidante.

Referências

AOAC. **Official methods of analysis of AOAC International**. 18. ed. Gaithersburg: AOAC International, 2005.

CAMPANHA, Raquel Bombarda; Et al. Atividade antioxidante de extratos hidroalcoólicos obtidos de diferentes biomassas lignocelulósicas. In: ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA EMBRAPA AGROENERGIA, 6., 2020. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2020. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1127078/1/Atividade-antioxidante-de-extratos-2020.pdf

CHIK, Che E. N. C. E. et al. Extraction and characterization of Litopenaeus vannamei's shell as potential sources of chitosan biopolymers. **Journal of Food Science and Technology**, vol.11, no.3, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.32604/jrm.2023.022755.

CHONANANT, Chirapond et al. Biocomposite scaffolds based on chitosan extraction from shrimp shell waste for cartilage tissue engineering application. **ACS Omega**, v. 9, n. 38, p. 39419–39429, 2024. DOI: https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02910.

DANG, Yimeng; LI, Zhixi; YU, Fanqianhui. Recent Advances in Astaxanthin as an Antioxidant in Food Applications. **Antioxidants**, v. 13, n. 7, p. 879, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/antiox13070879.

DIANA, Giada et al. Spray drying of an oil-in-water emulsion containing vitamin D3: a synergy between formulation and process conditions to obtain microparticles. **International Journal of Pharmaceutics**, [s. l.], v. 673, n. 125384, p. 1–13, 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2025.125384

EMADI SHAIBANI, Mina; PAZOOKI, Jamileh. From shrimp processing waste to value-added bioproducts: Integrated biorefinery pathways. **Food and Bioproducts Processing**, v. 158, p. 220–230, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fbp.2026.04.016.

FAO. Food And Agriculture Organization Of The United Nations. **Quarterly Shrimp Analysis** - May 2025. Rome: FAO, 2025.

FOTODIMAS, Ioannis; IOANNOU, Zacharias; KANLIS, Grigorios. A Review of the Benefits of the Sustainable Utilization of Shrimp Waste to Produce Novel Foods and the Impact on Human Health. **Sustainability**, v. 16, n. 16, p. 6909, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16166909.

GAO, Mingyue; TANG, Hanqi; ZHU, Hongguang. Advances in extraction, utilization, and development of chitin/chitosan and its derivatives from shrimp shell waste. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Chicago, v. 23, n. 5, e70008, 2024. DOI: 10.1111/1541-4337.70008.

GHANEM, S. N. et al. Spectroscopic approaches for structural analysis of extracted chitosan generated from chitin deacetylated for escalated periods. **BMC Chemistry**, v. 19, art. 214, 2025. DOI: https://doi.org/10.1186/s13065-025-01558-3.

HABIB, S. et al. Nanoencapsulation of astaxanthin using gum arabic and whey protein isolate as wall materials: Characterization and in vitro release kinetics. **Powder Technology**, v. 458, p. 120982, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120982.

HOSKIN, R. T., M. H. Grace, J. Xiong, and M. A. Lila. 2023. SprayDrying Microencapsulation of Blackcurrant and Cocoa Polyphenols Using Underexplored Plant-Based Protein Sources. **Journal of Food Science**, v.88, n. 6, p. 2665–2678. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16590.

HOSNEY, A.; ULLAH, S.; BARČAUSKAITĖ, K.. A review of the chemical extraction of chitosan from shrimp wastes and prediction of factors affecting chitosan yield by using an artificial neural network. **Marine Drugs**, v. 20, n. 11, 675, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/md20110675.

LA, J. W.; KIM, M.-J.; LEE, J. H. Evaluation of solvent effects on the DPPH reactivity for determining the antioxidant activity in oil matrix. **Food Science and Biotechnology**, v. 30, n. 3, p. 367–375, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s10068-020-00874-9.

SHARAYEI, Parvin et al. Optimization of wall materials for astaxanthin powder production from shrimp shell extract using simplex lattice mixture design. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2024b, art. 9794290. DOI: https://doi.org/10.1155/2024/9794290.

SHARAYEI, Parvin; et al. The impact of drying techniques on stabilizing microencapsulated astaxanthin from shrimp shells: a comparative study of spray drying versus freeze drying. **Journal of Food Process Engineering**, v. 47, n. 11, e14755, 2024a. DOI: https://doi.org/10.1111/jfpe.14755

SILVA, Denise M. L. e et al. Chemical Characteristics and Antioxidant Activity of Astaxanthin Extracted from Shrimp Residues Using Soybean Oil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 32, n. 6, p. 1277-1285, 2021. DOI: https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210030.

SILVA, Marcelo Bruno de Oliveira; OLIVEIRA, Sueli Aparecida de; ROSA, Derval dos Santos. Comparative study on microwave-assisted and conventional chitosan production from shrimp shell: Process optimization, characterization, and environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 440, n. 140726, p. 1–11, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140726

XIMENES, Luciano Feijão; VIDAL, Maria de Fátima. **Carcinicultura**. Caderno Setorial ETENE. BNB: Fortaleza, ano 10, n. 418, p. 1-12, dez. 2025.

ZHANG, Zuying; et al. Maximizing crustaceans (shrimp, crab, and lobster) by-products value for optimum valorization practices: A comparative review of their active ingredients, extraction, bioprocesses and applications. **Journal of AdvancedResearch**, v. 57, p. 59–76, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.11.002.

Anexos



Figura 01 - Espectros de FTIR da (A) quitina, (B) quitosana extraída e (C) quitosana purificada



Tabela 01 - Atividade antioxidante do ORC e do IRC determinada pelos ensaios ABTS e DPPH

CÓDIGO: SB0889

AUTOR: MELTIAS REBOUCAS JALES DE QUEIROZ ASSIS

ORIENTADOR: ROBERTA TARGINO HOSKIN

TÍTULO: Alterações físico-químicas e bioativas em formulações à base de chá verde e maracujá-amarelo (Passiflora edulis) fermentadas com cultura de kombucha

Resumo

Este trabalho avaliou as alterações físico-químicas e bioativas em formulações à base de chá verde e/ou polpa de maracujá-amarelo (Passiflora edulis) submetidas à fermentação por cultura de kombucha durante 10 dias. Foram analisados pH, sólidos solúveis, acidez titulável, compostos fenólicos totais e atividade antioxidante pelos métodos DPPH e ABTS. Todas as formulações apresentaram redução do pH e aumento da acidez titulável, confirmando a acidificação durante a fermentação. F2 apresentou a maior acidez final entre as formulações comparáveis, enquanto F3 apresentou a maior redução dos sólidos solúveis. O teor de compostos fenólicos variou conforme a composição da matriz, com aumentos mais evidentes em F1 e F5. A atividade antioxidante também apresentou comportamento dependente do método, com tendência de aumento no DPPH e respostas mais heterogêneas no ABTS. Entre F2, F3 e F4, nenhuma formulação apresentou desempenho superior em todos os parâmetros, indicando que a seleção de condições para estudos posteriores deve considerar a característica de interesse. Os resultados demonstram que a fermentação de matrizes contendo maracujá com cultura de kombucha promove alterações relevantes nas características físico-químicas e bioativas, embora as limitações de replicação restrinjam comparações inferenciais entre todas as condições.

Palavras-chave: kombucha; maracujá; fermentação; fenólicos; antioxidantes.

TITLE: Physicochemical and Bioactive Changes in Formulations Based on Green Tea and Yellow Passion Fruit (Passiflora edulis) Fermented with a Kombucha Culture

Abstract

This study evaluated physicochemical and bioactive changes in formulations based on green tea and/or yellow passion fruit pulp (Passiflora edulis) fermented with a

kombucha culture for 10 days. pH, soluble solids, titratable acidity, total phenolic compounds, and antioxidant activity by DPPH and ABTS assays were determined. All formulations showed a decrease in pH and an increase in titratable acidity, confirming acidification during fermentation. F2 showed the highest final acidity among the comparable formulations, whereas F3 presented the greatest reduction in soluble solids. Total phenolic content varied according to matrix composition, with more pronounced increases in F1 and F5. Antioxidant activity was also method-dependent, showing an overall increasing trend in the DPPH assay and more heterogeneous responses in the ABTS assay. Among F2, F3, and F4, no formulation performed best for all parameters, indicating that the selection of conditions for further studies should consider the target characteristic. Overall, fermentation of passion fruit-containing matrices with kombucha culture promoted relevant physicochemical and bioactive changes, although replication limitations restricted inferential comparisons among all conditions.

Keywords: kombucha; passion fruit; fermentation; phenolics; antioxidants.

Introdução

A kombucha é uma bebida fermentada tradicionalmente produzida a partir de infusão adoçada de Camellia sinensis e de uma cultura simbiótica composta principalmente por leveduras e bactérias. Durante a fermentação, esses microrganismos utilizam os açúcares disponíveis e promovem a formação de diferentes metabólitos, especialmente ácidos orgânicos, resultando em alterações como redução do pH e aumento da acidez da bebida (SOARES et al., 2023; HUANG, 2024).

Além das modificações físico-químicas, a fermentação pode alterar os compostos bioativos presentes no substrato. Transformações promovidas pela microbiota podem modificar a disponibilidade e a reatividade de compostos fenólicos e, consequentemente, a atividade antioxidante medida por ensaios in vitro. Entretanto, a magnitude e a direção dessas alterações dependem da composição da matriz, das condições de fermentação e dos microrganismos envolvidos (SOARES et al., 2023; HUANG, 2024).

Nos últimos anos, frutas e outros materiais vegetais vêm sendo estudados como substratos alternativos ou complementares ao chá, tanto por fornecerem açúcares fermentescíveis quanto por apresentarem compostos próprios de interesse nutricional e tecnológico. Entre essas matrizes, o maracujá-amarelo (Passiflora edulis) destaca-se pela presença de vitamina C, carotenoides e outros fitoquímicos, além de características sensoriais marcantes. Da Silva et al. (2024) demonstraram a viabilidade da produção de bebida tipo kombucha utilizando P. edulis, observando durante a fermentação alterações na acidez, no pH, nos sólidos solúveis e em parâmetros relacionados à atividade antioxidante. Apesar desses resultados, ainda são limitados os estudos que investigam o comportamento do maracujá submetido à fermentação por cultura de kombucha e sua combinação com o chá tradicional.

A composição do substrato pode influenciar diretamente o desenvolvimento do processo fermentativo. A presença de chá verde adiciona compostos característicos de

C. sinensis, enquanto a polpa de maracujá fornece açúcares, ácidos e compostos bioativos próprios da fruta. Da mesma forma, a adição ou ausência de sacarose pode modificar a disponibilidade inicial de substrato para a microbiota. Assim, a comparação entre formulações contendo chá verde e maracujá, maracujá adoçado e maracujá sem adição de sacarose permite avaliar como diferentes composições se relacionam com as alterações promovidas pela fermentação.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as alterações físico-químicas e bioativas em formulações à base de chá verde e/ou polpa de maracujá-amarelo (Passiflora edulis) submetidas à fermentação por cultura de kombucha durante 10 dias, considerando parâmetros de pH, sólidos solúveis, acidez titulável, compostos fenólicos totais e atividade antioxidante pelos métodos DPPH e ABTS.

Metodologia

Foram utilizados chá verde (Camellia sinensis), sacarose cristal e polpa comercial de maracujá-amarelo (Passiflora edulis) Delícia da Fruta (Macaíba-RN), constituída exclusivamente pela fruta, segundo o fabricante. A polpa foi mantida congelada e descongelada por imersão da embalagem em água à temperatura ambiente. Foram avaliados dois inóculos de kombucha: I1, mantido no laboratório e previamente utilizado pelo grupo de pesquisa, e I2, obtido por meio de parceria com o Departamento de Farmácia da UFRN.

2.1 Testes preliminares para avaliar a composição do meio fermentativo

Foram realizados testes para definição da matéria-prima e das condições de fermentação. Frutos in natura apresentaram baixo rendimento de polpa. Em seguida, testou-se a polpa Pura Polpa, com comportamento fermentativo pouco consistente em parte dos ensaios, e posteriormente adotou-se a polpa Delícia da Fruta. Também foram avaliadas polpa integral e polpa diluída 1:2, com inulina, sacarose, glicose ou sem suplementação, além de diferentes inóculos, acompanhando-se pH e sólidos solúveis. A inulina foi utilizada apenas nessa etapa preliminar.

Inicialmente, a pasteurização foi feita por aquecimento direto até a ebulição. Por ser pouco prática e de difícil padronização, foi substituída por banho-maria a 80 °C por 2 min, sem sinais visíveis de contaminação. Também foi testada fermentação em estufa a 25 °C, porém ocorreram elevada turbidez e formação irregular e dispersa do biofilme. Por isso, adotou-se temperatura ambiente. O período de 10 dias foi definido porque, nos testes preliminares, houve pouca alteração adicional dos parâmetros acompanhados após esse período.

2.2 Produção de bebidas à base de chá verde e maracujá-amarelo (Passiflora edulis) fermentadas com cultura de kombucha

A infusão de chá verde foi preparada com 6 g de chá/L de água destilada, aquecida até o início da formação de vapor, seguida de infusão por 10 min e adição de 80 g/L de

sacarose. Foram preparadas sete formulações com 400 mL de base antes da inoculação. F1 foi composta por chá verde adoçado; F2 e F6, por 200 mL de chá verde + 200 mL de polpa; F3 e F7, por polpa com sacarose a 8% (m/v); F4, por polpa sem adição de sacarose; e F5, por chá verde com sólidos solúveis ajustados de 0,21 para 10,39 °Brix com sacarose. Em F2 e F6, a sacarose total foi 32 g/400 mL. A composição completa, os inóculos e o número de unidades de fermentação estão apresentados no Quadro 1, disponibilizado em arquivo suplementar.

As formulações foram acondicionadas em frascos de vidro e pasteurizadas em banho-maria a 80 °C por 2 min, resfriadas em água gelada até temperatura ambiente e inoculadas em câmara de fluxo laminar com materiais esterilizados em autoclave a 121 °C por 15 min. Para cada 400 mL de base, adicionaram-se 60 mL de inóculo líquido (15%), totalizando 460 mL em frascos de 800 mL. F1 a F5 utilizaram I1 e F6 e F7 utilizaram I2. Os frascos foram cobertos com papel-toalha autoclavado e mantidos por 10 dias à temperatura ambiente, protegidos da luz solar direta.

2.3 Avaliação das formulações

pH e sólidos solúveis foram determinados antes e após 10 dias. O pH foi medido diretamente em amostras homogeneizadas com potenciômetro digital, e os sólidos solúveis, sem diluição, em refratômetro digital, em °Brix. A acidez titulável foi determinada por método adaptado do Instituto Adolfo Lutz (2008): 1 mL de amostra foi diluído em 50 mL de água destilada, acrescido de fenolftaleína e titulado em duplicata com NaOH 0,1 mol/L (fator 0,971), com resultado em g de ácido cítrico/100 mL.

As amostras iniciais destinadas às análises bioativas foram congeladas e analisadas juntamente com as do décimo dia. Os compostos fenólicos totais foram determinados pelo método de Folin-Ciocalteu adaptado para microplacas (MEDEIROS et al., 2025), com leitura a 765 nm e quantificação por curva de ácido gálico, em mg EAG/L. A atividade antioxidante por DPPH foi determinada conforme Bobo-García et al. (2015), com leitura a 515 nm e resultado em porcentagem de inibição. O ABTS foi determinado conforme Re et al. (1999) e Rufino et al. (2007), com leitura a 734 nm e quantificação por curva de Trolox, em µmol TE/L. As determinações em microplaca foram realizadas em oito repetições analíticas por amostra.

2.4 Análises estatísticas

Os dados foram analisados de forma descritiva. Quando havia repetições analíticas, utilizou-se a média para representar cada unidade de fermentação. Para F1 a F5, o valor da formulação correspondeu à média das duas unidades de fermentação; F6 e F7, com uma unidade cada, foram avaliadas de forma exploratória. As alterações entre o início e o décimo dia foram descritas pela diferença entre os valores finais e iniciais e, quando pertinente, pela variação percentual. Não foram realizados testes estatísticos inferenciais.

2.5 Uso de ferramentas de inteligência artificial

Ferramentas de inteligência artificial generativa foram utilizadas como apoio à revisão textual e à organização dos dados e procedimentos de análise. Fontes, procedimentos e

resultados foram verificados pelos autores, que permanecem responsáveis pela interpretação, conclusões e conteúdo.

Resultados e Discussões

3.1 Alterações físico-químicas durante a fermentação

As formulações apresentaram acidificação ao longo dos 10 dias de fermentação, evidenciada pela redução do pH e pelo aumento da acidez titulável em todas as condições avaliadas. O pH final variou de 2,61 a 3,07, enquanto os valores iniciais ficaram entre 2,90 e 4,55. Esse comportamento é compatível com fermentações conduzidas por culturas de kombucha, nas quais o metabolismo microbiano favorece a formação de ácidos orgânicos a partir dos substratos disponíveis (SOARES et al., 2023; HUANG, 2024).

O aumento da acidez foi particularmente pronunciado em F2, que passou de 1,33 para 4,77 g de ácido cítrico/100 mL, e F4, de 2,95 para 4,35 g/100 mL. A variação do pH, entretanto, não acompanhou proporcionalmente a acidez titulável. Isso é esperado porque o pH está relacionado à atividade dos íons hidrogênio no meio, enquanto a acidez titulável representa a quantidade de espécies ácidas neutralizáveis e é influenciada pela capacidade tamponante da matriz.

Os sólidos solúveis diminuíram em F2, F3, F4, F6 e F7. Entre as formulações conduzidas em duas unidades de fermentação, F3 apresentou a maior redução, de 15,91 para 6,26 °Brix, seguida de F4, de 9,89 para 5,36 °Brix, e F2, de 11,60 para 7,93 °Brix. Da Silva et al. (2024) também observaram redução de sólidos solúveis ao longo de 10 dias em bebida tipo kombucha elaborada com Passiflora edulis. Essa diminuição pode estar associada ao consumo de açúcares e de outros componentes solúveis durante a fermentação. Apesar de ser usada comumente como um índice do teor de açúcares da amostra, a determinação de sólidos solúveis por °Brix não corresponde exclusivamente ao teor de açúcares, pois inclui outros sólidos solúveis da amostra.

F1 e F5 apresentaram comportamento distinto, com pequeno aumento do teor de sólidos solúveis de 7,52 para 8,55 e de 9,82 para 11,03 °Brix, respectivamente. Esse resultado, isoladamente, não indica aumento de açúcares, uma vez que a composição do meio fermentado pode alterar a resposta refratométrica. Em ambas as formulações, a redução do pH e o aumento da acidez titulável sustentam de forma mais consistente a ocorrência de alterações fermentativas.

3.2 Compostos fenólicos totais e atividade antioxidante

O teor estimado de compostos fenólicos totais também respondeu de forma diferente entre as formulações. F1 aumentou de 103,64 para 132,66 mg EAG/L e F5 de 100,91 para 131,25 mg EAG/L, correspondendo a aumentos de aproximadamente 28 e 30%, respectivamente. F2 e F4 apresentaram aumentos de menor magnitude, enquanto F3 permaneceu relativamente estável, com pequena redução de 111,72 para 109,79 mg

EAG/L. F6 apresentou aumento e F7 redução, mas essas duas condições foram avaliadas em apenas uma unidade de fermentação e, por isso, foram interpretadas de forma exploratória.

A ausência de uma resposta uniforme é compatível com a literatura sobre kombucha. Durante a fermentação, a microbiota pode promover liberação e transformação de compostos fenólicos presentes na matriz, aumentando a resposta do método de Folin-Ciocalteu; por outro lado, oxidação, degradação e outras transformações podem contribuir para estabilidade ou redução dos valores, dependendo do substrato e das condições do processo (SOARES et al., 2023; HUANG, 2024). Como o método fornece uma medida global e não identifica individualmente os compostos presentes, essas possibilidades devem ser interpretadas como mecanismos plausíveis, e não como transformações diretamente demonstradas neste estudo.

A atividade antioxidante apresentou comportamento dependente do ensaio. No DPPH, a tendência predominante foi de aumento da porcentagem de inibição após a fermentação. Entre as formulações com dados comparáveis, F1 passou de 21,89 para 27,18%, F3 de 25,19 para 29,69% e F5 de 22,00 para 27,90%. No ABTS, as respostas foram mais heterogêneas: F1 aumentou de 177,35 para 196,31 µmol TE/L e F4 de 77,06 para 94,59 µmol TE/L; F5 apresentou pequena elevação, de 155,03 para 161,12 µmol TE/L; F2 apresentou discreta redução, de 123,16 para 119,88 µmol TE/L; e F3 permaneceu praticamente estável, de 83,29 para 82,69 µmol TE/L. F6 e F7 também apresentaram aumento no ABTS, porém sem replicação suficiente para comparações entre inóculos.

As diferenças entre DPPH e ABTS são coerentes com o fato de esses ensaios utilizarem radicais e condições de reação distintas e, portanto, responderem de maneira diferente ao conjunto de antioxidantes presente na amostra (RUFINO et al., 2007). F3 ilustra esse comportamento: houve aumento da inibição no DPPH, enquanto o ABTS permaneceu praticamente estável e os compostos fenólicos apresentaram pequena redução. Assim, não se observou correspondência direta entre teor de fenólicos e atividade antioxidante, reforçando a necessidade de interpretar os ensaios de forma complementar.

3.3 Comparação entre as formulações e limitações do estudo

A comparação entre F2, F3 e F4 permite discutir diferenças associadas à composição das matrizes, sem atribuir superioridade a uma única condição. A formulação F2, constituída por chá verde e polpa de maracujá com sacarose, apresentou a maior acidez final entre as três, atingindo 4,77 g de ácido cítrico/100 mL e pH 2,61. A formulação F3, composta por polpa com sacarose, apresentou a maior redução de sólidos solúveis, de 15,91 para 6,26 °Brix. A formulação F4, constituída por polpa sem adição de sacarose, também apresentou redução do teor de sólidos solúveis e aumento da acidez. Esse comportamento sugere utilização de componentes solúveis naturalmente presentes no maracujá, mesmo sem suplementação de sacarose. Comportamento semelhante de acidificação e redução dos sólidos solúveis em matriz de Passiflora edulis foi descrito por da Silva et al. (2024).

A magnitude da redução do teor de sólidos solúveis não acompanhou diretamente a acidificação do meio. Embora a formulação F3 tenha apresentado maior redução dos sólidos solúveis que F2, o aumento da acidez foi mais pronunciado em F2. Isso sugere que as respostas dependem não apenas da quantidade de sólidos solúveis disponível,

mas também da composição da matriz e dos produtos formados ao longo da fermentação. Da mesma forma, não houve uma formulação que apresentasse os maiores resultados em todos os indicadores bioativos: F2 e F4 apresentaram aumento de fenólicos, mas apenas F4 mostrou aumento mais evidente no ABTS, enquanto o DPPH apresentou tendência de aumento em diferentes formulações.

F1 e F5, constituídas por chá, reforçaram a necessidade de avaliação conjunta dos parâmetros. Apesar do pequeno aumento do teor de sólidos solúveis, ambas apresentaram queda expressiva do pH, aumento da acidez e aumento dos compostos fenólicos totais. Dessa forma, um único indicador não foi suficiente para representar o comportamento das formulações durante o processo.

As formulações F6 e F7, inoculadas com a segunda cultura de kombucha (I2), também apresentaram redução do pH e dos sólidos solúveis e aumento da acidez após 10 dias, além de aumento da atividade antioxidante pelos métodos DPPH e ABTS. Esses resultados, contudo, são exploratórios, pois cada condição foi conduzida em apenas uma unidade de fermentação. Assim, não é possível atribuir as diferenças observadas ao tipo de inóculo nem estabelecer superioridade de uma cultura em relação à outra.

Algumas limitações devem ser consideradas. F1 a F5 foram conduzidas em duplicatas originadas da mesma preparação de base, enquanto F6 e F7 tiveram apenas uma replicata. Esse desenho reduz a independência experimental e, por isso, a interpretação foi mantida em caráter descritivo, sem inferências entre tratamentos. Além disso, foram avaliados somente o momento inicial e o décimo dia, o que permite descrever as alterações ocorridas no intervalo, mas não caracterizar a cinética da fermentação. No ensaio DPPH, a ausência de um dos registros iniciais de F2 também limita sua comparação direta entre os dois momentos. Por fim, Folin-Ciocalteu, DPPH e ABTS fornecem respostas globais e não permitem identificar quais compostos individuais foram responsáveis pelas alterações observadas.

Em conjunto, os resultados mostram que a fermentação promoveu acidificação em todas as formulações, enquanto as respostas de sólidos solúveis, compostos fenólicos e atividade antioxidante dependeram da composição da matriz e do método analítico. As formulações F2, F3 e F4 apresentaram perfis distintos: F2 se destacou descritivamente pelo aumento da acidez titulável, F3 pela redução dos sólidos solúveis e F4 pela acidificação acompanhada de aumento dos compostos fenólicos e da atividade antioxidante pelo ABTS. Esses perfis fornecem critérios para a seleção de condições em estudos posteriores, especialmente quando o interesse estiver direcionado à preservação ou ao favorecimento de características bioativas.

Conclusão

A fermentação das formulações à base de chá verde e/ou polpa de maracujá com cultura de kombucha promoveu alterações físico-químicas em todas as condições avaliadas, evidenciadas principalmente pela redução do pH e pelo aumento da acidez titulável após 10 dias. As variações nos sólidos solúveis, compostos fenólicos e atividade antioxidante, entretanto, dependeram da composição da matriz e do método analítico

utilizado. As formulações contendo chá verde e/ou polpa de maracujá apresentaram comportamentos distintos. Entre F2, F3 e F4, F2 apresentou o maior aumento da acidez titulável, F3 a maior redução dos sólidos solúveis e F4 apresentou acidificação acompanhada de aumento dos compostos fenólicos e da atividade antioxidante pelo método ABTS. Dessa forma, nenhuma condição apresentou desempenho superior em todos os parâmetros, indicando que a seleção de uma formulação deve considerar a característica de interesse para sua aplicação.

Os resultados também mostraram que as respostas de DPPH, ABTS e compostos fenólicos não ocorreram necessariamente de forma proporcional, reforçando a importância da utilização conjunta de diferentes indicadores na avaliação das propriedades bioativas. Embora as limitações de replicação impeçam comparações inferenciais entre todas as formulações, o estudo permitiu identificar condições promissoras para investigações posteriores envolvendo fermentação de maracujá com cultura de kombucha e possível aproveitamento dessas matrizes em novos produtos.

Referências

BOBO-GARCÍA, G.; DAVIDOV-PARDO, G.; ARROQUI, C.; VÍRSEDA, P.; MARÍN-ARROYO, M. R.; NAVARRO, M. Intra-laboratory validation of microplate methods for total phenolic content and antioxidant activity on polyphenolic extracts, and comparison with conventional spectrophotometric methods. Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 95, n. 1, p. 204–209, 2015. DOI: 10.1002/jsfa.6706.

DA SILVA, S. F.; CAVALCANTE, M. P.; SENSHENG, Y.; DOS SANTOS SILVA, S.; FROTA GABAN, S. V. Physicochemical Properties, Antioxidant Activity, and Sensory Profiles of Kombucha and Kombucha-Like Beverages Prepared Using Passion Fruit (Passiflora edulis) and Apple (Malus pumila). ACS Agricultural Science & Technology, v. 4, n. 9, p. 938–946, 2024. DOI: 10.1021/acsagscitech.4c00372.

HUANG, R. Exploring Kombucha: Production, Microbiota Biotransformation, Flavor, Health Benefits and Potential Risks. ACS Food Science & Technology, v. 4, n. 7, p. 1610–1625, 2024. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.4c00242.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. Coordenação de Odair Zenebon, Neus Sadocco Pascuet e Paulo Tiglea. 4. ed., 1. ed. digital. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

MEDEIROS, F. G. M. de; YOU, S. W.; HOSKIN, R. T.; MONCADA, M. Spray dried protein concentrates from white button and oyster mushrooms produced by ultrasound-assisted alkaline extraction and isoelectric precipitation. Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 105, n. 3, p. 1635–1650, 2025. DOI: 10.1002/jsfa.13940.

RE, R.; PELLEGRINI, N.; PROTEGGENTE, A.; PANNALA, A.; YANG, M.; RICE-EVANS, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation

decolorization assay. Free Radical Biology and Medicine, v. 26, n. 9–10, p. 1231–1237, 1999. DOI: 10.1016/S0891-5849(98)00315-3.

RUFINO, M. S. M.; ALVES, R. E.; BRITO, E. S. de; MORAIS, S. M. de; SAMPAIO, C. de G.; PÉREZ-JIMÉNEZ, J.; SAURA-CALIXTO, F. D. Metodologia científica: determinação da atividade antioxidante total em frutas pela captura do radical livre ABTS•+. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2007. 4 p. (Comunicado Técnico, 128).

SOARES, I. F.; LIMA, M. A. de; SILVA, R. A. da; COLUSSI, R. Effects of processing on the preparation of kombucha: a systematic review. International Journal of Food Science & Technology, v. 58, n. 11, p. 5648–5656, 2023. DOI: 10.1111/ijfs.16718.

Anexos



Quadro 1. Grupos experimentais para avaliação da composição das formulações de kombucha



Tabela 1. Valores de pH, teor de sólidos solúveis (°Brix) e acidez titulável das formulações de kombucha no início e após 10 dias de fermentação.

CÓDIGO: SB0902

AUTOR: ALAN HUDSON CAMILO CABRAL

COAUTOR: JOÃO PEDRO DOS SANTOS ALMEIDA

ORIENTADOR: MARCIA REGINA DA SILVA PEDRINI

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE CÁPSULAS DE ALGINATO DE SÓDIO CONTENDO SACCHAROMYCES BOULARDII, EXTRATO DE ACEROLA E RAÇÃO COMERCIAL

Resumo

O desenvolvimento de sistemas de encapsulação constitui uma estratégia para incorporar microrganismos probióticos e compostos bioativos em matrizes destinadas à alimentação aquícola. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar cápsulas de alginato de sódio contendo Saccharomyces boulardii, extrato de acerola e ração comercial para tilápia. A formulação foi submetida à gelificação iônica com cloreto de cálcio e posteriormente à liofilização. As cápsulas foram caracterizadas quanto à composição centesimal, atividade de água e viabilidade de S. boulardii, considerando células livres, cápsulas hidratadas e liofilizadas. As cápsulas liofilizadas apresentaram 6,20% de umidade, 16,85% de cinzas, 6,85% de fibra bruta, 5,79% de lipídios, 29,96% de proteínas e 34,35% de carboidratos. A atividade de água foi reduzida de 0,989 nas cápsulas hidratadas para 0,209 após a liofilização. A concentração de S. boulardii foi de $6{,}33 \times 10^{8}$ UFC/g nas cápsulas hidratadas e $1{,}18 \times 10^{7}$ UFC/g nas liofilizadas, correspondendo a 23,19% e 0,43%, respectivamente, da concentração das células livres. Os resultados demonstram a obtenção da matriz encapsulada e a recuperação de células viáveis após o processamento, embora a redução da viabilidade após a liofilização indique a necessidade de otimização das condições de processamento.

Palavras-chave: Encapsulamento; Probiótico; Bioativos; Liofilização; Viabilidade.

TITLE: Development and characterization of sodium alginate capsules containing Saccharomyces boulardii, acerola extract, and commercial feed.

Abstract

The development of encapsulation systems represents a strategy for incorporating probiotic microorganisms and bioactive compounds into matrices intended for aquaculture feed. In this context, the present study aimed to develop and characterize sodium alginate capsules containing Saccharomyces boulardii, acerola extract, and commercial tilapia feed. The formulation underwent ionic gelation with calcium chloride followed by freeze-drying. The capsules were characterized regarding proximate composition, water activity, and S. boulardii viability, comparing free cells, hydrated capsules, and freeze-dried capsules. The freeze-dried capsules exhibited 6.20% moisture, 16.85% ash, 6.85% crude fiber, 5.79% lipids, 29.96% protein, and 34.35% carbohydrates. Water activity decreased from 0.989 in hydrated capsules to 0.209 after freeze-drying. S. boulardii concentration was 6.33×10^8 CFU/g in hydrated capsules and 1.18×10^7 CFU/g in freeze-dried capsules, corresponding to 23.19% and 0.43%, respectively, of the free cell concentration. The results demonstrate the successful production of the encapsulated matrix and the recovery of viable cells after processing, although the reduction in viability following freeze-drying indicates a need to optimize processing conditions.

Keywords: Encapsulation; Probiotic; Bioactives; Lyophilization; Viability.

Introdução

1. Introdução

A intensificação da aquicultura tem ampliado a busca por estratégias nutricionais que contribuam para a manutenção da saúde e do desempenho dos organismos cultivados. Nesse contexto, os probióticos têm sido investigados como aditivos funcionais em rações, devido ao potencial de favorecer a microbiota intestinal, a utilização dos nutrientes, a resposta imune e a resistência dos peixes a condições adversas (Rohani et al., 2022). Entre os microrganismos de interesse, destaca-se a levedura Saccharomyces boulardii, cuja utilização na alimentação de peixes tem sido associada a respostas relacionadas ao crescimento, à imunidade e ao sistema antioxidante. Em juvenis de tilápia do Nilo (Oreochromis niloticus), Mashhadizadeh et al. (2024) observaram efeitos favoráveis da suplementação com S. boulardii, isoladamente ou em associação com Bifidobacterium bifidum, indicando seu potencial como aditivo funcional em dietas aquícolas. Resultados também foram observados em juvenis de carpa comum (Cyprinus carpio) suplementadas com S. boulardii e Lactobacillus rhamnosus (Hosseinzadeh et al., 2025).

Além dos probióticos, a utilização de compostos bioativos de origem vegetal constitui uma estratégia para o desenvolvimento de formulações funcionais e para o aproveitamento de subprodutos agroindustriais. A acerola (Malpighia emarginata DC.) apresenta compostos de interesse, incluindo ácido ascórbico e compostos fenólicos, que podem ser recuperados de seus subprodutos por diferentes métodos de extração. Estudos recentes demonstraram o potencial de resíduos de acerola como fonte de

compostos bioativos e atividade antioxidante, contribuindo para a valorização desses materiais (Mesquita et al., 2022; Silva, Nunes e Hoskin, 2023).

A incorporação de microrganismos e compostos bioativos em formulações alimentares requer sistemas capazes de favorecer sua incorporação e manutenção durante o processamento. O alginato de sódio é uma matriz utilizada na encapsulação de compostos e microrganismos, formando hidrogéis por gelificação iônica na presença de íons divalentes, como Ca^{2+}(Nezamdoost-Sani et al., 2023). Entretanto, as etapas de processamento, especialmente congelamento e liofilização, podem alterar as características da matriz e afetar a sobrevivência dos microrganismos encapsulados. Estudos demonstram que a composição do sistema e as condições de secagem são fatores relevantes para a manutenção da viabilidade de probióticos encapsulados em alginato (Yuan et al., 2022).

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar uma formulação destinada à suplementação alimentar de Betta splendens, contendo Saccharomyces boulardii e extrato de acerola incorporados em uma matriz de alginato de sódio. As cápsulas foram produzidas por gelificação iônica com cloreto de cálcio e posteriormente submetidas a liofilização, sendo caracterizadas quanto à composição centesimal, atividade de água e a viabilidade de S. boulardii.

Metodologia

2. Métodos

2.1 Cultivo de Saccharomyces boulardii

A levedura Saccharomyces boulardii foi obtida a partir de produto comercial Floratil © contendo 200 mg de células liofilizadas, acondicionado em sachê de 1 g, com concentração mínima declarada de 1 x 10º células. O protocolo de cultivo foi adaptado a partir das metodologias descritas por Shinde, Sun-Waterhouse e Brooks (2014) e Zhang et al. (2025), considerando as particularidades da levedura e as condições experimentais empregadas neste estudo.

Inicialmente, foram utilizados três tubos de ensaio contendo 9 mL de meio yeast extract, peptone e dextrose (YPD), nos quais foi adicionado um sachê de 1 g do Floratil em cada tubo. Após incubação a 30 °C durante 24 h, foram retiradas alíquotas das culturas e realizado o plaqueamento em ágar com YPD para obtenção de colônias isoladas. Após o crescimento nas placas, foram selecionadas três colônias para cada Erlenmeyer, totalizando seis Erlenmeyers com capacidade de 500 mL, contendo 200 mL de meio YPD em cada recipiente. As culturas foram então incubadas a 30 °C durante 24 h para ampliação da biomassa, posteriormente utilizada no processo de encapsulação.

2.2 Obtenção do extrato de acerola

O extrato foi obtido a partir de subprodutos de acerola, utilizando água destilada como solvente. O procedimento foi baseado e adaptado de Silva, Nunes e Hoskin (2023). Foram utilizados 4 g do material em 200 mL de água destilada. A extração foi realizada a 45 °C durante 45 min, sob agitação em agitador TE-139 (Tecnal). Após a extração, o material foi submetido à filtração a vácuo utilizando membrana de MCE com 47 mm de diâmetro e porosidade de 0,22 µm. O extrato obtido foi acondicionado em frasco Schott protegido da luz com papel alumínio e mantido sob refrigeração até sua utilização.

2.3 Formulação e encapsulação

As cápsulas foram formuladas utilizando alginato de sódio, ração comercial para tilápia, Saccharomyces boulardii, extrato de acerola, phosphate-buffered saline (PBS) e água destilada. O alginato de sódio foi utilizado na concentração de 2% (m/v), com os demais componentes adicionados de acordo com a formulação estabelecida. Inicialmente, o alginato foi solubilizado em água destilada e, em seguida, foram adicionados a ração comercial, a biomassa de S. boulardii, o extrato de acerola e PBS. A mistura foi homogeneizada em vórtex.

A formação das cápsulas foi realizada por gotejamento manual da formulação em solução de cloreto de cálcio a 1,47% (m/v), utilizando seringa de 10 mL com agulha de 0,7 mm, posicionada verticalmente a aproximadamente 15 cm da superfície da solução. As cápsulas permaneceram na solução de $CaCl_2$ durante 10 min para promover a gelificação iônica. Após a formação, foram lavadas com água destilada esterilizada e mantidas em PBS até a continuidade do processamento.

2.4 Congelamento e liofilização

Após a encapsulação, as cápsulas foram congeladas durante 24h no congelador à -20 °C. Em seguida, foram acondicionadas em bandejas previamente pesadas e submetidas à liofilização durante 48 h, utilizando liofilizador Liotop L101, n° de série 23512. O processo foi realizado em duas etapas, com duas bandejas em cada etapa. As cápsulas foram pesadas antes e após a liofilização para determinação da variação de massa.

2.5 Determinação da viabilidade de S. boulardii

A viabilidade de S. boulardii foi determinada por meio da contagem de unidades formadoras de colônias (UFC). Foram avaliadas células livres, cápsulas hidratadas e liofilizadas. As amostras de células livres foram suspensas em PBS, enquanto as cápsulas hidratadas e liofilizadas foram desestruturadas em solução de citrato de sódio a 1% (m/v), utilizando 1 g de amostra, seguida de homogeneização em vórtex para liberação das células da matriz. A partir das suspensões obtidas, foram realizadas diluições seriadas de 10^{-3} a 10^{-8}. Alíquotas de 0,1 mL das diluições selecionadas foram inoculadas em ágar YPD e incubadas a 30 °C durante 24–48 h. Após a incubação, as colônias foram contadas e os resultados expressos em UFC/g. A viabilidade relativa foi calculada considerando a concentração de células livres como referência.

2.6 Determinação da atividade de água

A atividade de água (Aw) foi determinada utilizando analisador Aqualab S3TE, série TE-8298. Antes das análises, o equipamento foi ligado e calibrado utilizando água

destilada como referência. As determinações foram realizadas a 25 °C, com o tempo de leitura de aproximadamente 10 min por amostra. Foram avaliadas cápsulas hidratadas e liofilizadas, e os valores obtidos foram registrados individualmente para posterior comparação.

2.7 Caracterização centesimal

A composição centesimal das cápsulas liofilizadas foi determinada quanto aos teores de umidade, cinzas, proteína bruta, lipídios e fibra bruta, conforme os procedimentos dos métodos oficiais do Instituto Adolfo Lutz (2008) e da AOAC (2005). O teor de carboidratos foi obtido por diferença. Para determinação de fibra bruta, foi realizado uma adaptação do procedimento do Instituto Adolfo Lutz, substituindo-se os filtros empregados no método original por pequenos sacos de TNT, em razão do entupimento observado durante a filtração. As demais etapas da análise foram mantidas conforme o protocolo adotado.

Resultados e Discussões

3. Resultados e Discussão

3.1 Caracterização centesimal

A caracterização centesimal das cápsulas liofilizadas apresentou 6,20 ± 0,30% de umidade, 16,85 ± 0,13% de cinzas, 6,85 ± 0,63% de fibra bruta, 5,79 ± 0,69% de lipídios, 29,96 ± 0,48% de proteínas e 34,35 ± 0,56% de carboidratos. Para fins de comparação descritiva, foram considerados os valores declarados pelo fabricante da ração comercial utilizada como componente da formulação, correspondentes a 12% de umidade, 12% de cinzas, 5,50% de fibra bruta, 6,00% de lipídios, 32,00% de proteínas e 32,50% de carboidratos.

Tabela 1 - Composição centesimal das cápsulas liofilizadas e da ração comercial.

Fonte: Elaboração própria

A interpretação desses resultados deve considerar que as cápsulas analisadas não eram constituídas exclusivamente pela ração comercial. A formulação incorporou alginato de sódio, biomassa de S. boulardii, extrato de acerola e PBS. Dessa forma, os valores obtidos representam a composição da matriz encapsulada como um sistema multicomponente, não sendo adequado interpretar as diferenças em relação à ração comercial como perdas ou ganhos de nutrientes provocados exclusivamente pelo encapsulamento. Nezamdoost-Sani et al. (2023) destacam que a composição do hidrogel e a associação do alginato com outros componentes são fatores relevantes nas propriedades dos sistemas destinados à encapsulação de probióticos.

O teor de umidade das cápsulas foi de 6,20%, inferior aos 12,00% declarados para a ração comercial. Essa redução está relacionada principalmente à remoção de água promovida pela liofilização, embora a composição da matriz também possa contribuir

para o valor final obtido. Em sistemas de alginato contendo probióticos, Kuo et al., (2022) observaram que a liofilização pode modificar as características físicas do material e reduzir sua atividade de água (Aw). No presente estudo, as cápsulas hidratadas apresentaram Aw de 0.989, enquanto as submetidas à liofilização apresentaram valor de 0.209, correspondendo a uma redução de aproximadamente 0,780. A redução simultânea do teor de umidade e da atividade de água evidencia a remoção e a menor disponibilidade de água na matriz após a liofilização.

Tabela 2 – Atividade de água e massa das cápsulas antes e após a liofilização.

Fonte: Elaboração própria

Essa redução simultânea do teor de umidade e da atividade de água (Aw) evidencia a eficiência da liofilização na remoção e na diminuição da disponibilidade de água livre na matriz polimérica. Esse decréscimo drástico nos parâmetros hídricos reflete diretamente sobre a massa e as características físicas globais do material.

A redução de água presente na matriz também foi acompanhada por uma expressiva diminuição de massa. Após 48 h de liofilização, a massa apresentou uma redução de 89,11%, correspondendo a uma recuperação de sólidos secos de apenas 10,89%. Esse comportamento está relacionado principalmente à remoção de água livre por sublimação durante o processo de liofilização. Analisados conjuntamente, os resultados de umidade (6,20%), atividade de água (0,209) e redução de massa demonstram que o processo foi altamente eficiente na desidratação e na obtenção de um material seco. Do ponto de vista tecnológico, essa severa desidratação garante a estabilidade microbiológica do produto final, uma vez que a baixíssima atividade de água e a umidade residual restringem reações químicas de deterioração e impossibilitam o crescimento de microrganismos contaminantes, resultando em um produto estável durante o armazenamento, em consonância com as observações de Kuo et al. (2022). Sob a perspectiva logística, a expressiva perda de massa e volume após a secagem representa uma vantagem competitiva crucial, minimizando a necessidade de espaço físico para estocagem, demandando embalagens com dimensões reduzidas e promovendo uma significativa otimização do transporte e distribuição física do suplemento.

O teor de cinzas determinado nas cápsulas liofilizadas foi de 16,85 ± 0,13%, valor significativamente superior aos 12,00% informados para a ração comercial pura12. Como as cápsulas constituem um sistema multicomponente, esse incremento na fração mineral é um reflexo direto da incorporação dos reagentes químicos e soluções eletrolíticas empregados no processo de encapsulação3. Quimicamente, o alginato de sódio introduz íons sódio na formulação original, enquanto o processo de reticulação por gelificação iônica na presença de cloreto de cálcio ($CaCl_2$ a 1,47%)5 promove a difusão e fixação de íons cálcio (Ca^{+2}) na rede polimérica para a estruturação tridimensional das cápsulas, conforme discutido por Nezamdoost-Sani et al. (2023) e Yuan et al. (2022). Adicionalmente, o uso do tampão fosfato salino (PBS) tanto na formulação quanto na manutenção das cápsulas hidratadas introduz sais residuais à matriz. Como a liofilização promoveu uma expressiva remoção de água (evidenciada pela redução de 89,11% na massa), esses minerais adicionados tornaram-se concentrados na matriz seca final, justificando quimicamente o expressivo aumento no percentual de cinzas. Do ponto de vista nutricional aquícola, esse enriquecimento mineral representa uma característica favorável, visto que os minerais são nutrientes

essenciais para o crescimento, desenvolvimento e manutenção das funções fisiológicas dos peixes (LALL, 2002)

Para a fração de fibra bruta, foi obtido o valor de 6,85 ± 0,63%, superior aos 5,50% declarados para a ração comercial. Esse incremento na fração fibrosa decorre diretamente da incorporação do alginato de sódio na formulação, o qual se comporta quimicamente como uma fibra alimentar solúvel (um polissacarídeo polimérico). Durante o protocolo padrão de determinação de fibra bruta, que submete a amostra a digestões ácida e básica sucessivas sob aquecimento, o comportamento macromolecular do alginato impõe desafios analíticos. Em meio aquoso, esse polímero hidrata-se rapidamente, gerando soluções de altíssima viscosidade e géis parciais que obstruem por completo os poros dos filtros de papel ou cadinhos de Gooch convencionais. Essa característica reológica da matriz de alginato, discutida por Nezamdoost-Sani et al. (2023), justifica o entupimento observado na filtração clássica. Por conseguinte, a adaptação metodológica com o uso de saquinhos de TNT foi crucial; a porosidade e a área superficial do TNT atuaram como uma barreira física eficiente, retendo os componentes fibrosos insolúveis da ração e da levedura, enquanto permitiram o fluxo da fase fluida viscosa, viabilizando a conclusão precisa da análise de forma reprodutível.

Em relação a lipídios, as cápsulas apresentaram 5,79%, próximo aos 6,00% declarados para a ração comercial. Essa proximidade indica que a fração lipídica determinada na formulação final permaneceu próxima ao valor informado para a ração, embora a comparação não permita estabelecer equivalência entre os dois materiais. Para os carboidratos, foi obtido valor de 34,35%, superior aos 32,50% declarados. Como esse componente foi determinado por diferença, sua variação está relacionada aos valores obtidos para os demais constituintes da composição centesimal.

O teor de proteína bruta das cápsulas liofilizadas foi de 29,96%, valor inferior aos 32,00% declarados para a ração comercial. Essa diferença pode estar relacionada à alteração da composição global da formulação decorrente da incorporação do alginato de sódio, Saccharomyces boulardii, extrato de acerola e demais componentes utilizados na obtenção das cápsulas. Para avaliar a adequação desse resultado em relação às necessidades nutricionais de Betta splendens, destaca-se o estudo de Zuanon et al. (2016), que avaliou experimentalmente diferentes níveis de proteína bruta em juvenis da espécie e estabeleceu uma exigência proteica entre 30 e 33% de proteína bruta. Os autores observaram respostas quadráticas para sobrevivência, ganho de peso e taxa de crescimento específicos, estimando valores de 30,95%, 33,13% e 29,55% de proteína bruta para maximizar esses parâmetros, respectivamente.

O teor de 29,96% de proteína bruta determinado nas cápsulas apresentou-se muito próximo da faixa de 30 a 33% estabelecida por Zuanon et al. (2016), estando apenas 0,04 ponto percentual abaixo do limite inferior. Além disso, o valor obtido foi superior ao nível de 29,55% estimado pelos autores para maximizar a taxa de crescimento especifico dos juvenis. Assim, embora ligeiramente inferior à faixa indicada, o teor proteico obtido encontra-se próximo aos níveis associados ao melhor desempenho de juvenis de B. splendens, representando um resultado favorável para a formulação desenvolvida.

3.2 Viabilidade de Saccharomyces boulardii

Os resultados da concentração e viabilidade relativa de Saccharomyces boulardii são apresentadas na Tabela 3. A concentração inicial obtida nas células livres foi de 2,73 × 10^9 UFC/g. Após a etapa de encapsulação, as cápsulas hidratadas apresentaram uma concentração de 6,33 × 10^8 UFC/g, o que representa uma viabilidade relativa de 23,19%. Essa redução inicial pode estar associada a perdas por lixiviação de células presentes na superfície das gotas durante o gotejamento em solução de CaCl2 e as subsequentes etapas de lavagem, ou ainda a limitações físicas de liberação das leveduras aprisionadas na malha de alginato durante o processo de desestruturação com citrato de sódio a 1% para plaqueamento.

Tabela – 3 Concentração e viabilidade relativa de Saccharomyces boulardii nas diferentes condições avaliadas.

Fonte: Elaboração própria

Após o processo de liofilização, observou-se uma redução severa na população viável, atingindo 1,18 × 10^7 UFC/g, o que equivale a uma viabilidade relativa de apenas 0,43% em relação às células livres. Esse decréscimo acentuado de viabilidade decorre das forças físicas e estresses fisiológicos impostos pelas etapas de congelamento lento a -20 °C por 24 h e posterior desidratação por sublimação no liofilizador. No congelamento lento, a lenta transição de fase da água livre induz a formação de cristais de gelo extracelulares de grandes dimensões que perfuram mecanicamente a integridade estrutural das membranas plasmáticas das leveduras, além de expor as células a um gradiente de estresse osmótico desidratante extremo. Conforme discutido por Yuan et al. (2022), as características físicas da matriz de alginato de sódio e as condições aplicadas na liofilização exercem influência direta sobre as taxas de sobrevivência de probióticos encapsulados, sendo que a rigidez estrutural conferida pela reticulação com íons Ca+2 pode intensificar a compressão mecânica sobre as células microbianas durante a expansão do gelo. Adicionalmente, Nezamdoost-Sani et al. (2023) apontam que a composição do hidrogel e sua associação com outros componentes são determinantes cruciais nas propriedades de proteção dos sistemas destinados à encapsulação de probiótico. Como a formulação original não continha agentes protetores adicionais, a barreira física isolada de alginato foi insuficiente para mitigar o colapso celular induzido pela liofilização, o que reforça a necessidade de estudos posteriores avaliando a utilização de crioprotetores para o aprimoramento da manutenção da viabilidade célula.

Conclusão

4. Conclusão

O estudo possibilitou o desenvolvimento de cápsulas de alginato de sódio a 2% (m/v) contendo Saccharomyces boulardii, extrato de acerola e ração comercial para tilápia, obtidas por gelificação iônica com $CaCl_2$ e submetidas à liofilização. A caracterização centesimal evidenciou diferenças entre a composição das cápsulas liofilizadas e os valores declarados para a ração comercial utilizada como componente da formulação, refletindo a incorporação dos diferentes constituintes à matriz.

A liofilização promoveu expressivamente redução da atividade de água e da massa das cápsulas, resultando na obtenção de uma matriz seca com baixa disponibilidade de água.

A redução da Aw para 0.209 e da massa em 89,11% evidencia a eficiência do processo na remoção de água, constituindo características favoráveis à conservação e ao armazenamento das cápsulas. Esses resultados demonstram o potencial da liofilização como etapa de processamento da formulação encapsulada, proporcionando características físicas favoráveis à obtenção de um produto seco. Quanto à viabilidade de S. boulardii, foram recuperadas células viáveis nas cápsulas hidratadas e liofilizadas, demonstrando a manutenção da viabilidade da levedura após o processo de encapsulação e, ainda, após a liofilização, embora tenha sido observada redução da concentração celular após o processamento.

Em conjunto, os resultados demonstram a viabilidade de obtenção e caracterização da matriz encapsulada, associada à obtenção de um material seco com baixa atividade de água e à recuperação de células viáveis de S. boulardii após a liofilização. Esses resultados evidenciam o potencial da estratégia de encapsulação e liofilização para a obtenção de uma matriz destinada à veiculação de componentes de interesse em formulações para alimentação aquícola. Como perspectivas, estudos posteriores poderão avaliar diferentes condições de congelamento e liofilização, a utilização de agentes protetores e a estabilidade das cápsulas durante o armazenamento, visando ao aprimoramento da recuperação e manutenção da viabilidade celular.

Referências

Referências

1. AOAC INTERNATIONAL. Official methods of analysis of AOAC International. 18. Ed. Gaithersburg: AOAC International, 2005.
2. HOSSEINZADEH, M.; ESLIMI ESFAHANI, D.; AHMADIFAR, E.; AHMADIFAR, M., SHAHRIARI MOGHADAM, M.; MOHAMMADZADEH, S.; EL-HAROUN, E. Improving health and disease resistance in common carp (Cyprinus carpio): The role of Saccharomyces boulardii and Lactobacillus rhamnosus and their combination. Animal Feed Science and Technology, v.327, 116435, 2025. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2025.116435.
3. INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. 4. Ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.
4. KUO, C.-C.; CLARK, S.; QIN, H.; SHI, X. Development of a shelf-stable, gel-based delivery system for probiotics by encapsulation, 3D printing, and freeze-drying. LWT, V. 157, 113075, 2022. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113075.
5. LALL, S. P. The Minerals. In: HALVER, J. E.; HARDY, R. W. (Eds.). Fish Nutrition. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2002. p. 259-308. DOI: 10.1016/B978-012319652-1/50006-9.
6. MASHHADIZADEH, N. et al. Enhancing growth performance, antioxidant defense, immunity response, and resistance against heat stress in nile tilapia (Oreochromis niloticus) fed Saccharomyces boulardii and/or bifidobacterium bifidum. Aquaculture Reports, v. 39, 102462, 2024. DOI: 10.1016/J.AQREP.2024.102462.
7. MESQUITA, P. C.; RODRIGUES, L. G. G.; MAZZUTTI, S.; RIBEIRO, P. R. V.; BRITO, E. S.; LANZA, M. Untargeted metabolomic profile of recovered bioactive compounds by subcritical water extraction of acerola (Malpighia

emarginata DC.) pomace. Food Chemistry, v. 397, 133718, 2022. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.133718.

8. NEZAMDOOST-SANI, N.; ALIZADEH KHALEDABAD, M.; AMIRI, S.; MOUSAVI KHANEGHAH, A. Alginate and derivatives hydrogels in encapsulation of probiotic bacteria: An updated review. Food Bioscience, v. 52, 102433, 2023. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.102433.
9. ROHANI, M. F.; ISLAM, S. M.; HOSSAIN, M. K.; FERDOUS, Z.; SIDDIK, M. A. B.; NURUZZAMAN, M.; PADENIYA, U.; BROWN, C.; SHAHJAHAN, M. Probiotics, prebiotics and synbiotics improved the functionality of aquafeed: Upgrading growth, reproduction, immunity and disease resistance in fish. Fish & Shellfish Immunology, v. 120, p. 569-589, 2022. DOI: 10.1016/j.fsi.2021.12.037.
10. SHINDE, T.; SUN-WATERHOUSE, D.; BROOKS, J. Co-extrusion encapsulation of probiotic Lactobacillus acidophilus alone or together with apple skin polyphenols: an aqueous and value-added delivery system using alginate. Food and Bioprocess Technology, v.7, p. 1581-1596, 2014. DOI: 10.1007/s11947-013-1129-1.
11. SILVA, E. S.; NUNES, A. O.; HOSKIN, R. T. Ultrasound-assisted polyphenol extraction of acerola and jambolan pomaces: comparison of extraction protocols, kinetic modeling, and life cycle assessment. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, v. 191, 109443, 2023. DOI: 10.1016/j.cep.2023.109443.
12. YUAN, Y.; LIU, F.; CHEN, M.; KRYSTALLI, E.; GIATRAKOU, V.; ZHONG, F. Mechanism analysis of calcium-induced low freeze-drying survival of probiotic encapsulated in alginate. Food Hydrocolloids, v. 145, 109065, 2023. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.109065.
13. YUAN, Y.; YIN, M.; CHEN, L.; LIU, F.; CHEN, M.; ZHONG, F. Effect of calcium ions on the freeze-drying survival of probiotic encapsulated in sodium alginate. Food Hydrocolloids, v. 130, 107668, 2022. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107668.
14. ZHANG, F.; XIE, Z.; TANG, R.; TIAN, G.; HUANG, Y.; LIU, Q.; GUO, X. Encapsulation of Lacticaseibacillus paracasei with natural extract of Flos Sophorae Immaturus exhibits commendable gastrointestinal tolerance, storage stability and probiotic effects. Food Bioscience, v. 68, 106632, 2025. DOI: 10.1016/j.fbio.2025.106632.
15. Zuanon, J. A. S.; MORAIS, J. A.; CARNEIRO, A. P. S.; CAMPELO, D. A. V.; PONTES, M. D.; SLARO, A. L. Dietary crude protein levels for juvenile Betta splendens. Boletim do Instituto de Pesca, São Paulo, v. 42, n. 3, p. 509-597, 2016. DOI: 10.20950/1678-2305.2016v42n3p590.

Anexos



Tabela 1 - Composição centesimal das cápsulas liofilizadas e da ração comercial.



Tabela 2 – Atividade de água e massa das cápsulas antes e após a liofilização.



Tabela – 3 Concentração e viabilidade relativa de Saccharomyces boulardii nas diferentes condições avaliadas



Figura 1 – Etapas do cultivo de S. boulardii: (A) inoculação inicial; (B) seleção de colônias e (C) ampliação de cultivo em meio YPD.



Figura 2 – Etapas de obtenção do extrato de acerola: (A) pesagem do subproduto; (B) extração e (C) filtração.



Figura 3 – Formulação e liofilização das cápsulas: (A) formulação hidratada antes da liofilização e (B) cápsulas após o processo de liofilização.



Figura 4 – Etapas de determinação de lipídios e fibra bruta: (A) extração de lipídios; (B) pesagem da amostra e (C) determinação de fibra bruta.



Figura 5 – Etapas da determinação de proteína bruta: (A) destilação e (B) titulação.



Figura 6 – Determinação da atividade de água das cápsulas liofilizadas.

CÓDIGO: SB0953

AUTOR: MARIA VITORIA LIBERATO NOGUEIRA

ORIENTADOR: BEATRIZ DE CASSIA MARTINS SALOMAO

TÍTULO: Avaliação Microbiológica de Leite in natura para detecção de Staphylococcus aureus

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade microbiológica em duas amostras de leite *in natura* (denominadas de "Leite V" e "Leite G") sem passar pelo processo de fervura e investigar colônias suspeitas de *Staphylococcus aureus*. As análises foram realizadas no Laboratório de Microbiologia de Alimentos do Complexo de Laboratórios de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Para isso, foi realizado o preparo de diluições seriadas (10^{-1}, 10^{-2}, and 10^{-3}) inoculadas em duplicata em meio Ágar Sal Manitol (MSA) e incubadas a 35°C por aproximadamente 72 horas. Após esse período, realizou-se a contagem das colônias desenvolvidas e observou-se que a amostra de "Leite V" apresentou uma contagem de 4,5 x 10^3 UFC/mL, enquanto a amostra de "Leite G" registrou 5,4 x 10^4 UFC/mL. Diante dos resultados obtidos, verificou-se que a amostra de "Leite G" apresentou uma elevada quantidade de colônias presuntivas de *Staphylococcus aureus*, sugerindo possíveis falhas no manejo higiênico-sanitário durante a ordenha, falhas no armazenamento do produto ou indícios clínicos de mastite bovina no rebanho. Conclui-se que o meio Ágar Sal Manitol (MSA) foi eficiente para a provável detecção e quantificação de colônias suspeitas da bactéria e destaca-se a importância da avaliação microbiológica e das boas práticas de fabricação em alimentos para a saúde do consumidor.

Palavras-chave: Leite cru. Staphylococcus aureus. Segurança alimentar. Microbiologia.

TITLE: Microbiological Evaluation of Raw Milk for the Detection of Staphylococcus aureus

Abstract

This study aimed to evaluate the microbiological quality of two raw milk samples (designated "Milk V" and "Milk G") that had not undergone boiling, and to investigate colonies suspected of being *Staphylococcus aureus*. Analyses were conducted at the Food Microbiology Laboratory within the Food Engineering Laboratory Complex at the Federal University of Rio Grande do Norte. Serial dilutions (10^{-1}, 10^{-2}, and 10^{-3}) were prepared, inoculated in duplicate onto Mannitol Salt Agar (MSA), and incubated at 35°C for approximately 72 hours. Following incubation, the developed colonies were counted; the "Milk V" sample showed a count of 4.5 x 10^3 CFU/mL, while the "Milk G" sample recorded 5.4 x 10^4 CFU/mL. The results revealed a high number of presumptive *Staphylococcus aureus* colonies in the "Milk G" sample, suggesting potential lapses in hygienic-sanitary practices during milking, failures in product storage, or clinical signs of bovine mastitis in the herd. It is concluded that Mannitol Salt Agar (MSA) was effective for the probable detection and quantification of suspected colonies of the bacterium, highlighting the importance of microbiological assessment and good manufacturing practices for consumer health.

Keywords: Raw milk. Staphylococcus aureus. Food safety. Microbiology.

Introdução

O leite bovino é um dos alimentos que está frequentemente presente na dieta humana devido ao seu elevado valor nutricional, no qual é fundamental para o desenvolvimento e manutenção da saúde. Entretanto, devido à sua composição, alta atividade de água e pH próximo à neutralidade, se torna um excelente ambiente de crescimento bacteriano (CARVALHO et al., 2018). No leite *in natura*, esses fatores, aliados à falta de um tratamento térmico eficaz para a eliminação dos microrganismos presentes, contribuem para a rápida multiplicação microbiana e se torna um veículo para a transmissão de microrganismos patogênicos e para o desenvolvimento de Doenças Transmitidas por Alimentos (DTA) (SUDHANTHIRAMANI; SWETHA; BHARATHY, 2015; CAMPOS et al., 2021).

Dentre as bactérias contaminantes presentes no leite cru, destaca-se o *Staphylococcus aureus*, agente causador da mastite bovina em vacas leiteiras, patógeno que afeta a saúde do úbere animal e compromete a qualidade do produto final (BORGES et al., 2008). A contaminação de leite por *Staphylococcus aureus* também pode ocorrer por vias indiretas, decorrente de falhas no manejo higiênico-sanitário por parte do ordenhador, visto que a bactéria *Staphylococcus aureus* em humanos está presente na pele e em mucosas, bem como pela a ausência de fervura do produto final por parte do consumidor, o que facilita a permanência dos microrganismos no leite consumido (SUDHANTHIRAMANI; SWETHA; BHARATHY, 2015; RUFFATO; WEBER, 2020).

A intoxicação alimentar estafilocócica está associada à ingestão de alimentos contendo enterotoxinas produzidas por *Staphylococcus aureus*, com sintomas característicos de náuseas, vômitos, cólicas abdominais e diarreia, que podem se manifestar rapidamente após o consumo, o que desperta preocupação com relação à eficácia dos tratamentos térmicos, uma vez que essas toxinas são termoestáveis e podem permanecer ativas mesmo após processos como a fervura ou a pasteurização, caso já tenham sido produzidas previamente no alimento (BORGES et al., 2008).

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo identificar colônias presuntivas de *Staphylococcus aureus* em duas amostras de leite *in natura*, coletadas sem antes passar por métodos de tratamento térmico, tendo em vista que o consumo ainda é comum por conta de crenças regionais em relação à superioridade nutricional do leite cru, além de questões socioeconômicas relacionadas à facilidade de acesso e custos menos elevados em pequenas comunidades rurais.

Metodologia

O presente trabalho teve como objetivo realizar a análise microbiológica em duas amostras de leite *in natura*, coletadas em diferentes estabelecimentos, a fim de identificar colônias presuntivas de *Staphylococcus aureus* em meio Ágar Sal Manitol (MSA). O estudo foi conduzido no Laboratório de Microbiologia de Alimentos do curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), utilizando metodologia semelhante à empregada por Campos et al. (2021).

Primeiramente, as amostras foram individualmente identificadas e retirou-se uma alíquota de 25 mL de cada amostra, transferidas assepticamente para 225 mL de água peptonada tamponada autoclavada 0,1%, também identificadas, e em seguida foram homogeneizadas por aproximadamente 60 segundos para a diluição 10^{-1}. Após esse processo, as amostras passaram pelas diluições decimais seriadas em 10^{-2} e 10^{-3}.

As amostras foram inoculadas em placas de Petri contendo Ágar Sal Manitol (MSA) utilizando 100 µL (0,1 mL) e espalhadas utilizando alças de Drigalski esterilizadas. Para um cálculo mais preciso da população microbiana, todos os procedimentos deste estudo foram realizados em duplicata.

Após a inoculação das amostras, as placas de Petri foram identificadas de acordo com sua diluição, invertidas e incubadas em estufa a 35°C por aproximadamente 72 horas. Após esse período, procedeu-se à leitura e contabilização das colônias presuntivas de *Staphylococcus aureus*, considerando aquelas que apresentaram uma coloração amarela cercadas por uma zona ou halo amarelo brilhante, indicativo de características morfológicas

de colônias fermentadoras de manitol (GEBREMEDHIN et al., 2022; HAQ et al., 2024).

A concentração da população microbiana foi determinada por Unidade Formadoras de Colônia por mililitro (UFC/mL), considerando as placas que apresentaram entre 25 a 300 colônias. Para o cálculo, foi considerada a média aritmética do número de colônias contabilizadas, multiplicado pelo fator de diluição correspondente e dividido pelo volume utilizado na inoculação da placa (100 µL). Os resultados obtidos foram organizados em uma tabela e interpretados de acordo com dados disponíveis na literatura a respeito da qualidade higiênico-sanitária do leite *in natura*.

Resultados e Discussões

As análises microbiológicas realizadas nas duas amostras do leite in natura mostraram uma possível presença da bactéria *Staphylococcus aureus*, evidenciada pelo crescimento de colônias com características morfológicas típicas no meio Ágar Sal Manitol (MSA). A quantificação presuntiva das colônias está representada nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

De acordo com as diretrizes laboratoriais clássicas estabelecidas pelas metodologias da APHA, a determinação da população microbiana, que é expressa por UFC/mL, deve-se considerar as contagens em placas que apresentem um intervalo de 25 a 300 colônias. Diante disso, foi desconsiderado as placas nas quais apresentaram uma contabilização que ficaram muito abaixo do limite de 25 colônias.

A partir dos resultados obtidos, é notável que a amostra de “Leite G” apresentou um crescimento microbiológico elevado em comparação com a amostra de “Leite V", sugerindo uma falha no ato de processamento, produção ou na manipulação do produto, afetando a qualidade higiênico-sanitária.

Na amostra de “Leite V”, a diluição seriada 10^{-1} apresentou 45 colônias, enquanto a sua duplicata apresentou apenas 2 colônias, no entanto, foi desconsiderado no cálculo para determinar a provável densidade populacional bacteriana, de acordo com dados expostos pela literatura. Ao multiplicar o valor das colônias obtidas pelo fator inverso da diluição (10-1) e dividido pelo volume usado na inoculação da placa (0,1 mL), obteve-se o resultado de 4,5 x 10^3 UFC/mL para a amostra de "Leite V".

.Para a amostra de "Leite G", na diluição seriada em 10^{-1}, observou-se 91 colônias na Placa 1, enquanto a sua duplicata na Placa 2 apresentou um resultado incontável. Na diluição seriada em 10^{-2}, a Placa 1 apresentou 84 colônias e a Placa 2 apresentou 24 colônias. Diante desses resultados, foi calculada a média aritmética das duplicatas (média de 54 colônias) e multiplicado pelo fator inverso da diluição correspondente (10-2) e dividido pelo volume usado

na inoculação da placa (0,1 mL), obteve o resultado presuntivo de 5,4 x 10^4 UFC/mL para o "Leite G".

Avaliando dados da literatura, observa-se que Carvalho et al. (2018), avaliando leite cru comercializado informalmente no município de Zé Doca (MA), registraram contagens de *Staphylococcus spp*. entre 1,9 x 10^3 e 5,24 x 10^6 UFC/mL, enquanto Ruffato e Weber (2020), em Cascavel (PR), encontraram contagens presuntivas de S. aureus que variaram de 0,8 x 10^6 a 8,8 x 10^9 UFC/mL, a depender do método de coleta da amostra. Já Gebremedhin et al. (2022), em Holeta na Etiópia, relataram uma contagem presuntiva de 6,92 x 10^7 UFC/mL. Diante disso, a densidade populacional da microbiota obtida nas amostras de "Leite V" e "Leite G" são menores que as encontradas em mais estudos com o leite in natura. Entretanto, essa limitação não deixa de ser um alerta, visto que a presença dessas colônias já apresenta um possível risco à saúde do consumidor. Araújo et al. (1989) demonstraram a produção de enterotoxina B por uma cepa de *Staphylococcus aureus* isolada de uma amostra de leite cru que apresentava contagem de apenas 860 bactérias/mL, evidenciando que a presença de enterotoxina não pode ser descartada apenas com base na contagem bacteriana.

Apesar das amostras apresentarem colônias presuntivas com características de *Staphylococcus aureus*, ainda não é possível interpretar esses resultados como indicativo para intoxicação alimentar. Para avaliar o risco de intoxicação, seria necessário investigar a presença de enterotoxinas estafilocócicas, uma vez que, quando produzidas no alimento, algumas dessas toxinas apresentam elevada termoestabilidade e podem permanecer ativas mesmo após tratamentos térmicos, como a pasteurização.

Por fim, os resultados reforçam a importância da fervura como medida de controle, embora com limitações. Por mais que um tratamento térmico eficaz seja capaz de eliminar os patógenos, as toxinas estafilocócicas são termoestáveis e podem continuar ativas mesmo após esse processo (BORGES et al., 2008). Esse fato ressalta a importância das boas práticas de fabricação antes e depois do processamento do produto final como maneira de evitar riscos à saúde do consumidor.

Conclusão

Os resultados obtidos permitiram identificar colônias presuntivas de *Staphylococcus aureus* em ambas amostras de leite *in natura* analisadas, evidenciando a presença desses microrganismos no leite cru sem tratamento térmico prévio, reforçando a hipótese da falha das condições higiênico-sanitárias durante a ordenha ou de possíveis indícios clínicos de mastite bovina no rebanho, além das hipóteses de contaminações cruzadas por parte do ordenhador.

O meio Ágar Sal Manitol (MSA), utilizado na literatura consultada, demonstrou ser eficiente para a identificação das colônias com características de fermentadoras de manitol, compatíveis com *Staphylococcus aureus*. Entretanto, os resultados obtidos possuem caráter presuntivo e não permitem afirmar a ocorrência de intoxicação alimentar. Para uma avaliação mais precisa do risco à saúde do consumidor, seria necessária a investigação da presença de enterotoxinas estafilocócicas, considerando que algumas apresentam elevada termoestabilidade e podem permanecer ativas mesmo após tratamentos térmicos, como a pasteurização.

Este estudo reforça a importância da avaliação microbiológica em alimentos consumidos no dia-a-dia, tal como o leite *in natura*, além de enfatizar a necessidade das boas práticas de fabricação desde a ordenha até o ato do consumo, bem como a importância de um tratamento térmico como uma maneira de reduzir os riscos de contaminação e garantir a segurança alimentar da população.

Referências

ARAUJO, W. P.; IARIA, S. T.; PAIM, G. V.; VERIN, C. S. Staphylococcus aureus em leite cru. I. Contagem, verificação da enterotoxigenicidade e fagotipagem das cepas isoladas. Revista da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo, v. 26, n. 2, p. 187–198, 1989. DOI: 10.11606/issn.2318-3659.v26i2p187-198.

APHA. American Public Health Association. Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods. 4th ed. Washington, 2001.

BORGES, M. F.; ARCURI, E. F.; PEREIRA, J. L.; FEITOSA, T.; KUAYE, A. Y. Staphylococcus enterotoxigênicos em leite e produtos lácteos, suas enterotoxinas e genes associados: revisão. B.CEPPA, Curitiba, v. 26, n. 1, p. 71-86, jan./jun. 2008.

CAMPOS, J. V. F.; RESENDE, L. C.; BASTOS, A. F.; SILVA, M. O.; ACURCIO, L. B. Search for Staphylococcus spp. in "Minas Frescal" cheeses made with raw milk and commercialized in the city of Formiga - MG. Caderno de Ciências Agrárias, v. 13, p. 01-05, 2021. DOI: https://doi.org/10.35699/2447-6218.2021.32993

CARVALHO, A. S. S.; SERRA, J. L.; RODRIGUES, L. C.; RODRIGUES JUNIOR, L. S.; MOUCHREK, A. N.; FERREIRA, E. M. Susceptibilidade de Staphylococcus aureus isolados de leite cru a antibióticos comerciais. Ciência Animal Brasileira, Goiânia, v. 19, p. 1-8, e-47159, 2018. DOI: 10.1590/1809-6891v19e-47159

GEBREMEDHIN, E. Z.; ARARSO, A. B.; KELBESA, K. A.; TADESE, N. D.; MUITOS, L. M.; SARBA, E. J. Isolamento e identificação de Staphylococcus

aureus em leite e produtos lácteos, fatores associados à contaminação e seu antibiograma em Holeta, Etiópia Central. Veterinary Medicine International, v. 2022, ID 6544705, 13 p., 2022. DOI: https://doi.org/10.1155/2022/6544705

HAQ, I. U.; KAMAL, M.; SWELUM, A. A.; KHAN, S.; DE LOS RÍOS-ESCALANTE, P. R.; USMAN, T. Resistência alarmante a múltiplos fármacos em Staphylococcus aureus isolado do leite cru de vacas com mastite subclínica: padrões de resistência a antibióticos e ocorrência de genes de resistência selecionados. PLoS ONE, v. 19, n. 5, e0301200, 2024. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301200

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 6888-1: Microbiology of food and animal feeding stuffs — Horizontal method for the enumeration of coagulase-positive staphylococci (Staphylococcus aureus and other species) — Part 1: Technique using Baird-Parker agar medium. Geneva, 1999.

RUFFATO, B.; WEBER, L. D. Avaliação microbiológica de leite cru em função de diferentes formas de coleta. Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária FAG, v. 3, n. 1, p. 39-53, jan./jun. 2020.

SUDHANTHIRAMANI, S.; SWETHA, C. S.; BHARATHY, S. Prevalence of antibiotic resistant Staphylococcus aureus from raw milk samples collected from the local vendors in the region of Tirupathi, India. Veterinary World, v. 8, n. 4, p. 478-481, 2015. DOI: 10.14202/vetworld.2015.478-481

Anexos



Tabela 1 - Contagem microbiológica de Staphylococcus aureus na amostra de “Leite V”.



Tabela 2 - Contagem microbiológica de Staphylococcus aureus na amostra de “Leite G”.

CÓDIGO: SB0972

AUTOR: DAIANA AVELINO DA SILVA

ORIENTADOR: ROBERTA TARGINO HOSKIN

TÍTULO: Conceitos verdes e utilização total de recursos naturais aplicados a matéria-prima vegetal abundante no Nordeste brasileiro

Resumo

O presente trabalho avaliou a aplicação da extração assistida por ultrassom como estratégia sustentável para a recuperação de antocianinas de Hibiscus sabdariffa L. Foram avaliados diferentes sistemas extratores e tempos de sonicação. A água foi selecionada como solvente por apresentar elevada eficiência de extração e dispensar o uso de solventes orgânicos. O tempo de 40 minutos foi escolhido por proporcionar boa recuperação de antocianinas sem prolongamento desnecessário do processamento. O extrato obtido foi concentrado em rotaevaporador a 55 °C e, devido à indisponibilidade do spray dryer, submetido à secagem em estufa com diferentes concentrações de maltodextrina. A melhor condição foi obtida com extrato não concentrado acrescido de 50% de maltodextrina, possibilitando a formação de material seco e triturável. O pó apresentou umidade de 5,57 ± 0,04%, atividade de água de 0,319 ± 0,003, pH de 2,80 ± 0,01 e parâmetros de cor L* = 50,13 ± 4,66, a* = 7,74 ± 5,70 e b* = 5,39 ± 0,26. Os resultados demonstram o potencial da extração ultrassônica associada a condições mais sustentáveis para obtenção de ingredientes derivados do hibisco.

Palavras-chave: Hibiscus sabdariffa; ultrassom; antocianinas; extração verde

TITLE: Green concepts and total utilization of natural resources applied to plant raw materials abundant in Northeastern Brazil

Abstract

This study evaluated ultrasound-assisted extraction as a sustainable strategy for the recovery of anthocyanins from Hibiscus sabdariffa L. Different extraction systems and sonication times were investigated. Water was selected as the extraction solvent because it showed high extraction efficiency while avoiding the use of organic solvents. A sonication time of 40 minutes was chosen because it provided good anthocyanin recovery without unnecessarily extending processing time. The extract was concentrated in a rotary evaporator at 55 °C and, due to the unavailability of the spray dryer, dried in an oven using different maltodextrin concentrations. The best condition was obtained with non-concentrated extract containing 50% maltodextrin, which allowed the production of a dry material suitable for grinding. The powder showed moisture content of 5.57 ± 0.04%, water activity of 0.319 ± 0.003, pH of 2.80 ± 0.01, and color

parameters L* = 50.13 ± 4.66, a* = 7.74 ± 5.70, and b* = 5.39 ± 0.26. The results demonstrate the potential of ultrasound-assisted extraction combined with more sustainable processing conditions to obtain hibiscus-derived ingredients.

Keywords: Hibiscus sabdariffa; ultrasound; anthocyanins; green extraction

Introdução

O Hibiscus sabdariffa L. tem ganhado crescente popularidade como matéria-prima vegetal devido ao seu amplo potencial funcional e aos diversos benefícios associados à saúde (Montalvo-González, et al., 2022). Trata-se de um arbusto com folhas de coloração avermelhada ou amarronzada, sendo suas partes comestíveis, especialmente os cálices, amplamente utilizadas em pesquisas em razão de suas propriedades bioativas (Silva, et al., 2022). A coloração característica do Hibiscus sabdariffa L. decorre da presença de antocianinas, compostos fenólicos bioativos responsáveis não apenas pelo pigmento vermelho-intenso, mas também por significativa atividade antioxidante. Em razão dessas propriedades, o hibisco tem sido amplamente explorado nas indústrias alimentícia e farmacêutica como fonte natural de corante e agente funcional (Hoang, et al., 2023). Além disso, o hibisco tem se destacado por seus potenciais benefícios à saúde, incluindo a prevenção de doenças cardiovasculares e a modulação do metabolismo glicêmico, o que tem ampliado sua aplicação industrial e impulsionado a demanda por produtos mais saudáveis e naturais (Li, et al., 2024). Para a obtenção desses compostos bioativos, são frequentemente empregados métodos convencionais de extração, como maceração, soxhlet e hidrodestilação, devido ao seu baixo custo e simplicidade operacional. No entanto, essas técnicas geralmente demandam elevado consumo de solventes e longos períodos de processamento, podendo favorecer a degradação térmica de compostos termossensíveis e, consequentemente, a perda parcial de suas propriedades antioxidantes (Sun, et al., 2025). Ademais , a escolha do solvente é um fator determinante para a qualidade e segurança do extrato obtido, uma vez que solventes orgânicos podem gerar resíduos potencialmente prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana (Sun et al., 2025). Nesse contexto, a Extração Assistida por Ultrassom (EAU) tem se destacado como uma alternativa promissora aos métodos convencionais(Pinela et al., 2019) . Considerada uma técnica de extração verde, a EAU possibilita a redução do tempo de processamento, do consumo energético e da quantidade de solvente utilizada. Sua maior eficiência na recuperação de compostos bioativos, como as antocianinas, está relacionada ao efeito de cavitação, que promove a ruptura das paredes celulares e facilita a liberação desses compostos(Pinela et al., 2019; Paraíso et al., 2019) Dessa forma, considerando o potencial funcional do Hibiscus sabdariffa L., torna-se essencial adotar métodos de extração que associem eficiência, segurança e sustentabilidade. A utilização de técnicas verdes contribui para a obtenção de extratos com menor risco de contaminação por resíduos tóxicos, reduzindo impactos ambientais e garantindo maior segurança para aplicações nas indústrias farmacêutica e alimentícia. Nessa perspectiva, o objetivo deste trabalho é aplicar protocolos de extração assistida por ultrassom como estratégia sustentável para a recuperação de compostos bioativos do Hibiscus sabdariffa L., avaliando parâmetros que influenciam o rendimento e a preservação das antocianinas. Posteriormente, os extratos obtidos serão utilizados para a produção de um pó rico em compostos bioativos, destinado à aplicação em produtos alimentícios, visando ao desenvolvimento de ingredientes com potencial funcional, estabilidade físico-química e viabilidade tecnológica. Espera-se, assim,

contribuir para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis na indústria de alimentos, promovendo a valorização de matérias-primas vegetais abundantes no Nordeste brasileiro.

Metodologia

O hibisco (Hibiscus sabdariffa L.) utilizado neste estudo foi adquirido comercialmente na forma desidratada, da marca Lucena, em Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. Os cálices foram triturados em triturador elétrico para redução do tamanho das partículas e homogeneização da matéria-prima. Para os ensaios de extração, foram pesados 5 g de hibisco triturado e adicionados 50 mL do respectivo solvente extrator, mantendo-se a proporção sólido:solvente de 1:10 (m/v). Foram avaliados água destilada, mistura água/etanol 50:50 (v/v) e etanol nos tempos de 5, 10, 20 e 40 minutos. Também foram avaliadas diferentes proporções de água e etanol: 100% água, água/etanol 50:50, água/etanol 30:70, água/etanol 70:30 e 100% etanol. As extrações foram realizadas em banho ultrassônico Cleaner, modelo DK-1500E, com frequência de 33/40 kHz. Após cada período de sonicação, as amostras foram centrifugadas a 3000 RCF por 10 minutos em centrífuga DAIKI, modelo DT-4500, e o sobrenadante foi coletado para determinação do teor de antocianinas. Posteriormente, foi realizado ensaio adicional comparando 40 e 60 minutos de extração utilizando água, água/etanol e etanol. A partir dos resultados, foram selecionados água como solvente e 40 minutos de sonicação para a continuidade do processo. Para obtenção do extrato na condição selecionada, foram utilizados 25 g de hibisco triturado e 250 mL de água destilada, mantendo-se a proporção 1:10 (m/v), seguidos de 40 minutos de extração assistida por ultrassom e centrifugação a 3000 RCF por 10 minutos. O teor de antocianinas monoméricas foi determinado pelo método do diferencial de pH, conforme protocolo baseado em Song et al. (2013). Foram utilizadas soluções tampão de pH 1,0 (KCl/HCl 0,025 M) e pH 4,5 (acetato de sódio/HCl 0,4 M). Para cada determinação, foram adicionados 60 µL da amostra e 240 µL do respectivo tampão em microplaca de 96 poços. Após homogeneização e incubação por 20 minutos, as absorbâncias foram determinadas a 510 e 700 nm utilizando leitor de microplacas ASYS/Biochrom, operado pelo software DigiRead. A concentração de antocianinas foi calculada considerando a absorbância corrigida, massa molar da cianidina-3-glicosídeo de 449 g/mol, fator de diluição, absortividade molar de 26900 e caminho óptico. Os resultados foram expressos em mg de equivalentes de cianidina-3-glicosídeo por litro de extrato (mg EC3G/L). Após a seleção das condições de extração, o extrato aquoso foi submetido à concentração em rotaevaporador Quimis, modelo da série Q344M/Q344M2, a 55 °C. Foram coletadas amostras em T0, antes da concentração, T1 após 1 hora, T2 após 2 horas e T3 após 3 horas. Em cada período foram retiradas alíquotas para determinação das antocianinas. Antes da análise, as amostras concentradas foram diluídas na proporção de 1:100, sendo esse fator considerado no cálculo final. A secagem estava inicialmente prevista para ser realizada por atomização em spray dryer. Entretanto, devido à indisponibilidade do equipamento durante o período experimental, foi utilizada secagem em estufa como alternativa. No primeiro ensaio, o extrato concentrado a 36,6 °Brix, sem agente carreador, foi submetido à secagem a 50 °C durante 24 horas. Posteriormente, foram realizados ensaios com maltodextrina como agente carreador. Inicialmente, foram utilizados 10 mL de extrato concentrado acrescido de 10% de maltodextrina, com secagem a 55 °C por 24 horas. Em seguida, foram avaliadas formulações contendo 25%, 50% e 75% de maltodextrina, utilizando extrato concentrado a 21 °Brix, além de

um ensaio contendo 6 mL de extrato não concentrado acrescido de 50% de maltodextrina. Todas as formulações foram distribuídas em placas de Petri e submetidas à secagem a 55 °C durante 24 horas. A formulação preparada com extrato não concentrado e 50% de maltodextrina apresentou maior facilidade de remoção e foi selecionada para continuidade do estudo. O material seco foi acondicionado em frasco âmbar e posteriormente triturado com pistilo até a obtenção do produto em pó. A caracterização físico-química foi realizada no pó obtido a partir do extrato não concentrado acrescido de 50% de maltodextrina. Foram avaliados atividade de água, pH, cor instrumental e teor de umidade. A atividade de água foi determinada em equipamento AQUALAB, da Decagon Devices, em três determinações. Para o pH, 1 g do pó foi adicionado a 10 mL de água destilada, mantendo-se a proporção 1:10 (m/v), e analisado em pHmetro Simpla, modelo PH140, previamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0, também em três determinações. A cor foi determinada segundo o sistema CIELAB, avaliando-se os parâmetros L*, a* e b*, em quatro determinações. O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico em estufa. Aproximadamente 2 g de amostra foram pesados em cápsulas previamente identificadas e pesadas, sendo a análise realizada em triplicata. As amostras foram mantidas a 105 °C, com pesagens após 1 hora, mais 4 horas e outras 4 horas de secagem. Antes de cada pesagem, as cápsulas foram resfriadas em dessecador. O teor de umidade foi calculado a partir da perda de massa durante a secagem. Os resultados experimentais foram organizados e expressos como média ± desvio-padrão, sendo apresentados em tabelas e gráficos para comparação das diferentes condições avaliadas.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos demonstraram que a composição do sistema extrator exerceu influência significativa sobre a recuperação de antocianinas dos cálices de Hibiscus sabdariffa L. No primeiro ensaio, foram observados teores de 126,298 mg EC3G/L para a extração utilizando água, 146,822 mg EC3G/L para a mistura água/etanol 50:50 (v/v) e 7,334 mg EC3G/L para o etanol. Nesse primeiro experimento, a mistura hidroalcoólica apresentou o maior teor de antocianinas, enquanto o etanol isolado apresentou o menor valor. Entretanto, nos ensaios realizados posteriormente, observou-se melhor desempenho da água como solvente extrator. Na avaliação de diferentes proporções de água e etanol, foram obtidos valores de 168,876 mg EC3G/L para 100% água, 161,678 mg EC3G/L para água/etanol 50:50, 136,161 mg EC3G/L para água/etanol 30:70, 118,895 mg EC3G/L para água/etanol 70:30 e 10,839 mg EC3G/L para 100% etanol. Dessa forma, embora a mistura água/etanol tenha apresentado maior concentração no primeiro ensaio, a continuidade dos experimentos indicou que a água apresentou desempenho elevado e mais consistente, enquanto o etanol empregado isoladamente apresentou baixa eficiência na recuperação das antocianinas. Esse comportamento pode estar relacionado às características químicas das antocianinas, que apresentam elevada afinidade por solventes polares. Maciel et al. (2018) destacam que fatores como composição e volume do solvente, temperatura e tempo de processamento podem influenciar o rendimento de extração dos compostos bioativos presentes no hibisco. Dessa forma, os resultados obtidos evidenciam a importância da escolha adequada do meio extrator. Paraíso et al. (2019), ao avaliarem a extração assistida por ultrassom de compostos bioativos de Hibiscus sabdariffa L., verificaram condições favoráveis utilizando aproximadamente 25% de etanol, 45 minutos de extração e temperatura de 65 °C. Os autores também utilizaram uma proporção cálice:solvente de

1:10, semelhante à adotada no presente trabalho. Pinela et al. (2019) também demonstraram que a concentração de etanol pode influenciar a recuperação de antocianinas do hibisco, encontrando condições ótimas com aproximadamente 39,1% de etanol. Entretanto, diferenças entre temperatura, potência do ultrassom, características da matéria-prima e demais condições experimentais podem explicar as variações observadas entre os trabalhos. Apesar de alguns estudos relatarem bons resultados com sistemas contendo etanol, a água apresentou elevado desempenho nas condições experimentais utilizadas no presente estudo. Além disso, sua utilização dispensa a presença de solvente orgânico na etapa de extração, tornando o processo mais simples e compatível com a proposta de aplicação de técnicas mais sustentáveis. Diante disso, a água foi selecionada como solvente para a continuidade das etapas experimentais. Além da composição do solvente, foi investigada a influência do tempo de sonicação sobre a recuperação das antocianinas. Utilizando água como solvente, foram obtidos teores de 84,657 mg EC3G/L aos 5 minutos, 109,715 mg EC3G/L aos 10 minutos, 149,670 mg EC3G/L aos 20 minutos e 176,032 mg EC3G/L aos 40 minutos. Os resultados demonstraram aumento progressivo no teor de antocianinas à medida que o tempo de extração foi ampliado entre 5 e 40 minutos. Comparando-se os valores obtidos aos 5 e 40 minutos, observou-se aumento de aproximadamente 108% na concentração de antocianinas. Esse resultado indica que, nas condições utilizadas, a maior permanência da amostra no banho ultrassônico favoreceu a liberação dos pigmentos da matriz vegetal e sua transferência para o solvente. A influência do tempo de processamento também tem sido relatada na literatura. Maciel et al. (2018) demonstraram que as condições de extração, incluindo tempo e temperatura, podem interferir diretamente na recuperação dos compostos bioativos do hibisco. Paraíso et al. (2019) avaliaram tempos de 15, 30 e 45 minutos e identificaram 45 minutos como parte de uma região favorável para extração. Esse resultado apresenta proximidade com o observado neste estudo, no qual o aumento do tempo até 40 minutos promoveu maior recuperação das antocianinas. Diante da tendência crescente observada até 40 minutos, foi realizado um ensaio adicional comparando 40 e 60 minutos, com o objetivo de verificar se o aumento do tempo de processamento produziria um ganho suficientemente expressivo para justificar o prolongamento da sonicação. Para a água, foram obtidos 143,526 mg EC3G/L aos 40 minutos e 158,475 mg EC3G/L aos 60 minutos, correspondendo a um aumento de aproximadamente 10,4%. Para a mistura água/etanol, o teor passou de 71,971 para 86,389 mg EC3G/L, enquanto no extrato etanólico aumentou de 37,055 para 48,082 mg EC3G/L. Embora tenha ocorrido aumento numérico na recuperação das antocianinas aos 60 minutos, especialmente nos sistemas contendo etanol, o incremento observado para a água foi relativamente pequeno quando comparado ao acréscimo de 50% no tempo total de processamento. Assim, o período de 40 minutos foi selecionado para continuidade do estudo, considerando a necessidade de conciliar recuperação satisfatória dos compostos com menor duração do processo. A condição final escolhida foi, portanto, água como solvente, proporção sólido:solvente de 1:10 (m/v) e 40 minutos de extração assistida por ultrassom. Após a definição das condições de extração, o extrato aquoso foi submetido à concentração em rotaevaporador a 55 °C. O teor de antocianinas foi acompanhado durante o processo. Após a correção do fator de diluição de 1:100, foram encontrados valores de 225,33 mg EC3G/L no tempo inicial (T0), 206,56 mg EC3G/L após 1 hora de concentração (T1), 569,60 mg EC3G/L após 2 horas (T2) e 4221,74 mg EC3G/L após 3 horas (T3). Foi observada uma pequena redução entre T0 e T1, seguida por aumento expressivo nos períodos posteriores de concentração. Ao final do processo, o teor expresso em mg EC3G/L foi aproximadamente 18,7 vezes maior do que o valor inicial. Esse aumento deve ser

interpretado principalmente como consequência da remoção do solvente no rotaevaporador, promovendo concentração dos sólidos e dos compostos presentes no extrato em menor volume, e não como formação de novas antocianinas durante o processo. A pequena redução observada entre T0 e T1 pode estar relacionada à variabilidade experimental ou a possíveis alterações dos pigmentos durante o processamento. Maciel et al. (2018) demonstraram que a estabilidade das antocianinas de Hibiscus sabdariffa L. é influenciada pelas condições de processamento, principalmente pela temperatura e pelo período de exposição. Dessa forma, embora não seja possível atribuir diretamente a redução inicial à degradação, os resultados reforçam a importância do controle das condições durante a etapa de concentração. Ao final da rotaevaporação, também foi observado aumento expressivo do teor de sólidos solúveis, atingindo aproximadamente 39,97 °Brix. Esse resultado confirma a concentração do extrato promovida pela remoção de água e contribui para explicar o comportamento observado posteriormente durante a etapa de secagem. A produção do extrato na forma de pó estava inicialmente prevista para ser realizada por secagem por atomização em spray dryer. Entretanto, devido à indisponibilidade do equipamento durante o período experimental, foi necessário utilizar a secagem em estufa como alternativa. Essa alteração metodológica influenciou diretamente as características físicas do material obtido. No primeiro ensaio, o extrato concentrado a 36,6 °Brix foi submetido à secagem sem adição de agente carreador. Após 24 horas a 50 °C, foram obtidas massas secas de 0,5779, 0,6301 e 0,6356 g, correspondendo a aproximadamente 28,75%, 31,50% e 31,71% da massa inicialmente utilizada. A média foi de aproximadamente 30,65% de sólidos, indicando que aproximadamente 69,35% da massa inicial foi removida durante a secagem, principalmente na forma de água. Apesar da remoção significativa de água, o material obtido apresentou estrutura rígida, aspecto vítreo e forte aderência à superfície das cápsulas, dificultando a sua remoção e manipulação. Em razão desse comportamento, foram realizados novos ensaios com utilização de maltodextrina como agente carreador, visando melhorar as características do material após a secagem. Inicialmente, foi avaliada uma formulação com 10% de maltodextrina e 10 mL de extrato concentrado. Entretanto, mesmo após 24 horas de secagem a 55 °C, o material permaneceu com aspecto vítreo, rígido e quebradiço, indicando que, nas condições empregadas, a concentração de maltodextrina não foi suficiente para promover a formação de um produto com características adequadas de pó. Posteriormente, foram avaliadas formulações com 25%, 50% e 75% de maltodextrina utilizando o extrato concentrado com aproximadamente 21 °Brix. Após a secagem, essas formulações continuaram apresentando comportamento predominantemente vítreo, regiões pegajosas e elevada aderência às placas, dificultando a remoção do material. Em contrapartida, a formulação preparada com extrato não concentrado e 50% de maltodextrina apresentou comportamento superior. Essa condição permitiu remover quantidade suficiente de material da placa e, após a trituração, obter um produto com aparência de pó, que foi utilizado posteriormente nas análises físico-químicas. Os resultados sugerem que apenas o aumento da concentração de maltodextrina não foi suficiente para solucionar os problemas de aderência e formação de estrutura vítrea quando foram empregados extratos concentrados. O melhor comportamento apresentado pelo extrato não concentrado com 50% de maltodextrina indica que o teor inicial de sólidos do extrato também pode ter influenciado as características do material após a secagem. Entretanto, essa relação deve ser interpretada com cautela, pois não foram realizadas análises específicas de temperatura de transição vítrea ou caracterização estrutural do produto. Dessa forma, a associação entre o teor de sólidos e o comportamento observado constitui uma hipótese baseada nos resultados experimentais. Também é importante

considerar que o método de secagem utilizado foi diferente daquele inicialmente proposto. A secagem por atomização envolve condições de transferência de calor e massa diferentes da secagem convencional em estufa. Martins et al. (2020), ao estudarem a produção de pó de Hibiscus sabdariffa L. por spray drying com diferentes agentes carreadores, demonstraram a aplicabilidade dessa tecnologia para obtenção de produtos desidratados de hibisco com baixa atividade de água. Assim, os resultados obtidos em estufa não devem ser diretamente equiparados aos obtidos por spray drying. Apesar dessa limitação experimental, foi possível determinar uma condição alternativa capaz de fornecer material seco e triturável em quantidade suficiente para a caracterização físico-química. A formulação selecionada foi constituída por extrato não concentrado acrescido de 50% de maltodextrina. Na caracterização físico-química do pó, foram avaliados teor de umidade, atividade de água, pH e parâmetros instrumentais de cor. O teor de umidade obtido foi de 5,57 ± 0,04%, após a exclusão de uma determinação discrepante de 9,80%, em comparação às demais determinações, de 5,59% e 5,54%. O baixo valor de umidade indica que o processo de secagem promoveu redução importante da quantidade de água presente no material. A atividade de água (Aw) apresentou valor de 0,319 ± 0,003. Esse resultado demonstra baixa disponibilidade de água livre no pó produzido. Martins et al. (2020), ao avaliarem pós de Hibiscus sabdariffa obtidos por spray drying utilizando diferentes agentes carreadores e condições de processo, relataram valores de atividade de água inferiores a 0,27. Embora o valor obtido neste trabalho tenha sido ligeiramente superior aos observados pelos autores, ambos representam materiais com baixa atividade de água. O pH do produto foi de 2,80 ± 0,01, caracterizando um material de natureza ácida. Esse comportamento é compatível com as características próprias do hibisco e deve ser considerado em futuras aplicações do pó em produtos alimentícios, uma vez que o pH pode influenciar a estabilidade dos pigmentos, bem como características tecnológicas e sensoriais do produto final. Na análise instrumental de cor, foram obtidos valores de L* = 50,13 ± 4,66, a* = 7,74 ± 5,70 e b* = 5,39 ± 0,26. O valor positivo de a* demonstra tendência da amostra à coloração vermelha, característica importante em materiais derivados de Hibiscus sabdariffa L. O valor positivo de b* indica presença de componente amarela, enquanto L* representa a luminosidade do material. A presença de maltodextrina também deve ser considerada na interpretação da cor do pó, pois esse agente carreador apresenta coloração clara e pode aumentar a luminosidade do produto e reduzir visualmente a intensidade dos pigmentos presentes. Estudos com pós de hibisco demonstram que a quantidade e o tipo de agente carreador podem influenciar os parâmetros instrumentais de cor. De maneira geral, os resultados demonstraram que a extração assistida por ultrassom foi capaz de recuperar antocianinas dos cálices de Hibiscus sabdariffa L., sendo a água selecionada como solvente devido ao seu desempenho e à possibilidade de reduzir o emprego de solventes orgânicos. O tempo de 40 minutos apresentou relação favorável entre recuperação de antocianinas e duração do processo, enquanto o aumento para 60 minutos proporcionou incremento relativamente pequeno para a extração aquosa. A etapa de concentração promoveu aumento expressivo da quantidade de antocianinas expressa por unidade de volume em consequência da remoção de água. Na etapa de secagem, entretanto, foram observadas dificuldades associadas à formação de materiais vítreos e aderentes quando foram utilizados extratos concentrados. O emprego do extrato não concentrado com 50% de maltodextrina apresentou o melhor comportamento entre as condições testadas, permitindo obter material seco e triturável. A caracterização físico-química demonstrou que o produto obtido apresentou baixa umidade e baixa atividade de água, pH ácido e tendência à coloração vermelha. Os resultados evidenciam o potencial da combinação

de extração assistida por ultrassom, uso de água como solvente e aproveitamento do extrato para produção de um ingrediente desidratado. Entretanto, a utilização futura de uma técnica de secagem mais adequada, especialmente a secagem por atomização, poderá favorecer a obtenção de pós com melhores características tecnológicas e permitir avaliação mais aprofundada da estabilidade dos compostos bioativos.

Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram que as condições de extração exercem influência direta sobre a recuperação de antocianinas dos cálices de Hibiscus sabdariffa L. Entre os sistemas extratores avaliados, a água apresentou desempenho elevado e consistente, além de dispensar o uso de solventes orgânicos, sendo selecionada como alternativa mais adequada dentro da proposta de utilização de processos mais sustentáveis. Em relação ao tempo de extração assistida por ultrassom, observou-se aumento da recuperação das antocianinas com o prolongamento da sonicação. Entretanto, apesar do aumento observado aos 60 minutos, o tempo de 40 minutos foi selecionado por apresentar boa eficiência de extração sem aumento excessivo do tempo de processamento. Dessa forma, a condição definida para continuidade do estudo foi água como solvente, proporção sólido:solvente de 1:10 (m/v) e 40 minutos de extração assistida por ultrassom. A etapa de concentração em rotaevaporador a 55 °C promoveu aumento expressivo do teor de antocianinas expresso por unidade de volume, principalmente em decorrência da remoção de água e da consequente concentração dos compostos presentes no extrato. Entretanto, a elevada concentração de sólidos também esteve associada a dificuldades durante a etapa posterior de secagem. Devido à indisponibilidade do spray dryer, a secagem foi realizada em estufa. Os ensaios com extratos concentrados, mesmo com diferentes proporções de maltodextrina, resultaram predominantemente em materiais vítreos, pegajosos e aderidos às superfícies. A condição preparada com extrato não concentrado e 50% de maltodextrina apresentou o melhor comportamento entre as formulações avaliadas, possibilitando a obtenção de material seco, removível e passível de trituração. O pó obtido apresentou teor de umidade de 5,57 ± 0,04%, atividade de água de 0,319 ± 0,003 e pH de 2,80 ± 0,01. Os parâmetros de cor foram L* = 50,13 ± 4,66, a* = 7,74 ± 5,70 e b* = 5,39 ± 0,26, indicando tendência à coloração vermelha, característica dos produtos derivados do hibisco. De modo geral, o estudo demonstrou o potencial da extração assistida por ultrassom utilizando água como solvente para recuperação de antocianinas de Hibiscus sabdariffa L., contribuindo para uma rota de processamento mais alinhada aos conceitos de sustentabilidade. Apesar das limitações relacionadas à indisponibilidade do spray dryer, foi possível estabelecer uma alternativa de secagem e obter material suficiente para caracterização físico-química. Trabalhos futuros utilizando secagem por atomização e avaliações adicionais de estabilidade, propriedades tecnológicas e compostos bioativos poderão contribuir para a otimização do processo e ampliar as possibilidades de aplicação do produto como ingrediente alimentar.

Referências

HOANG, T. N. N.; NGUYEN, N. P. M.; DONG, T. A. D.; LE, T. H. A. Anthocyanin isolation from Hibiscus sabdariffa L. flowers by extraction, macroporous D101 resin

purification, and biological evaluation. Journal of Agriculture and Food Research, v. 14, 100848, 2023. DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100848. LI, N.; SIMON, J. E.; WU, Q. Determination of anthocyanins, organic acids, and phenolic acids in hibiscus market products using LC/UV/MS. Journal of Food Science, v. 89, p. 1098–1113, 2024. DOI: 10.1111/1750-3841.16909. MACIEL, L. G.; CARMO, M. A. V. do; AZEVEDO, L.; DAGUER, H.; MOLOGNONI, L.; ALMEIDA, M. M. de; GRANATO, D.; ROSSO, N. D. Hibiscus sabdariffa anthocyanins-rich extract: chemical stability, in vitro antioxidant and antiproliferative activities. Food and Chemical Toxicology, v. 113, p. 187–197, 2018. DOI: 10.1016/j.fct.2018.01.053. MARTINS, D. R. S.; SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J.; ORTEGA, N. F.; GARCIA, V. A. S.; OLIVEIRA, V. S.; CARDOSO, C. A. L. Production and characterization of Hibiscus sabdariffa by spray dryer using different sprinkler nozzles and carrier agents. Journal of Food Processing and Preservation, v. 44, n. 7, e14493, 2020. DOI: 10.1111/jfpp.14493. MONTALVO-GONZÁLEZ, E.; VILLAGRÁN, Z.; GONZÁLEZ-TORRES, S.; IÑIGUEZ-MUÑOZ, L. E.; ISIORDIA-ESPINOZA, M. A.; RUVALCABA-GÓMEZ, J. M.; ARTEAGA-GARIBAY, R. I.; ACOSTA, J. L.; GONZÁLEZ-SILVA, N.; ANAYA-ESPARZA, L. M. Physiological effects and human health benefits of Hibiscus sabdariffa: a review of clinical trials. Pharmaceuticals, v. 15, n. 4, 464, 2022. DOI: 10.3390/ph15040464. PARAÍSO, C. M.; SANTOS, S. S.; CORREA, V. G.; MAGON, T.; PERALTA, R. M.; VISENTAINER, J. V.; MADRONA, G. S. Ultrasound assisted extraction of hibiscus (Hibiscus sabdariffa L.) bioactive compounds for application as potential functional ingredient. Journal of Food Science and Technology, v. 56, n. 10, p. 4667–4677, 2019. DOI: 10.1007/s13197-019-03919-y. PEDRO, A. C.; GRANATO, D.; ROSSO, N. D. Extraction of anthocyanins and polyphenols from black rice (Oryza sativa L.) by modeling and assessing their reversibility and stability. Food Chemistry, v. 191, p. 12–20, 2016. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.02.045. PINELA, J.; PRIETO, M. A.; PEREIRA, E.; JABEUR, I.; BARREIRO, M. F.; BARROS, L.; FERREIRA, I. C. F. R. Optimization of heat- and ultrasound-assisted extraction of anthocyanins from Hibiscus sabdariffa calyces for natural food colorants. Food Chemistry, v. 275, p. 309–321, 2019. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.09.118. SILVA, A. G. da; RANOLFI, G. V. Os efeitos do Hibiscus sabdariffa e suas características nutricionais. RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar, v. 3, n. 12, e3122436, 2022. DOI: 10.47820/recima21.v3i12.2436. SUN, S.; YU, Y.; JO, Y.; HAN, J. H.; XUE, Y.; CHO, M.; BAE, S.-J.; RYU, D.; PARK, W.; HA, K.-T.; ZHUANG, S. Impact of extraction techniques on phytochemical composition and bioactivity of natural product mixtures. Frontiers in Pharmacology, v. 16, 1615338, 2025. DOI: 10.3389/fphar.2025.1615338. A publicação oficial confirma volume 16, artigo 1615338 e publicação em 30 de julho de 2025.

Anexos



Gráficos dos resultados experimentais do projeto

CÓDIGO: SB1146

AUTOR: RAIANE TAIS DA SILVA QUEIROZ

COAUTOR: THAÍS BEZERRA VERÍSSIMO MIGUEL

COAUTOR: KATIA NICOLAU MATSUI

ORIENTADOR: MARCIA REGINA DA SILVA PEDRINI

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MECÂNICA DE FILMES BIODEGRADÁVEIS DE DIFERENTES FONTES DE AMIDO

Resumo

A poluição provocada pelo descarte de plástico sintético tem impulsionado a pesquisa por embalagens biodegradáveis de fontes renováveis. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e caracterizar físico-quimicamente e mecanicamente filmes biodegradáveis elaborados pela método casting a partir de quatro fontes distintas de amido sendo elas: de milho e de polvilho azedo, ambas de procedência comercial, e as pouco convencionais extraídas do inhame e do subproduto da semente de jaca. Os filmes biodegradáveis foram avaliados quanto à espessura, teor de umidade, solubilidade em água, permeabilidade ao vapor de água (PVA) e propriedades mecânicas, tensão máxima e alongamento na ruptura. O filme de amido de inhame destacou-se com a maior resistência mecânica (3,75 ± 0,15 MPa) e a menor permeabilidade ao vapor d'água (5,79 ± 0,21 g.mm.m-2 .dia-1.kPa-1). O amido de semente de jaca gerou filmes de menor solubilidade (71,59 6,08 %), enquanto o amido de milho comercial mostrou a maior elasticidade (41,93 3,65 %). Já o polvilho azedo apresentou o menor desempenho de barreira à umidade (14,24 0,54 g.mm.m-2 .dia-1.kPa-1), apesar de sua espessura diferenciada. Logo, conclui-se que os amidos não convencionais extraídos apresentaram um bom potencial tecnológico para filmes, equiparando-se ou mostrando características superiores às fontes comerciais.

Palavras-chave: Polissacarídeos; Resíduos Agroindustriais; Propriedade Mecânica;

TITLE: DEVELOPMENT AND PHYSICOCHEMICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF BIODEGRADABLE FILMS FROM DIFFERENT STARCH SOURCES

Abstract

Pollution caused by the disposal of synthetic plastic has spurred research into biodegradable packaging made from renewable sources. The objective of this study was to develop and characterize physicochemically and mechanically biodegradable films produced by the casting method from four distinct sources of starch: corn starch and sour cassava starch, both commercially sourced, and the less conventional sources extracted from yams and jackfruit seed byproducts. The biodegradable films were evaluated for thickness, moisture content, water solubility, water vapor permeability (WVP), and mechanical properties, including maximum tensile strength and elongation at break. The yam starch film stood out for having the highest mechanical strength (3.75 ± 0.15 MPa) and the lowest water vapor permeability (5.79 ± 0.21 $g \cdot mm \cdot m^{-2} \cdot day^{-1} \cdot kPa^{-1}$). Jackfruit seed starch produced films with lower solubility (71.59 ± 6.08 %), while commercial corn starch exhibited the highest elasticity (41.93 ± 3.65 %). In contrast, sour cassava starch exhibited the lowest moisture barrier performance (14.24 ± 0.54 $g \cdot mm \cdot m^{-2} \cdot day^{-1} \cdot kPa^{-1}$), despite its distinct thickness. Therefore, it is concluded that the extracted unconventional starches demonstrated good technological potential for films, matching or exhibiting superior characteristics compared to commercial sources.

Keywords: Polysaccharides; Agroindustrial Waste; Mechanical Properties;

Introdução

A elevada persistência dos polímeros convencionais no meio ambiente e a urgente necessidade de reduzir a dependência de recursos fósseis têm impulsionado a busca por materiais obtidos a partir de fontes renováveis e com elevado potencial de biodegradabilidade. Nesse contexto, os biopolímeros de origem natural têm recebido atenção como alternativas sustentáveis aos polímeros sintéticos, especialmente para aplicações no setor de embalagens (Santhosh et al., 2024; Singh, 2024).

Entre os biopolímeros renováveis, o amido destaca-se pelas características favoráveis ao desenvolvimento de materiais biodegradáveis, incluindo sua ampla disponibilidade, baixo custo e capacidade intrínseca de formação de matrizes poliméricas. Ademais, o amido pode ser extraído e isolado a partir de diversas fontes vegetais, como cereais, raízes, tubérculos e coprodutos agrícolas (Singh, 2024; Amobonye et al., 2025).

Quimicamente, o amido é um polissacarídeo constituído predominantemente pelas macromoléculas amilose e amilopectina. A organização estrutural e a proporção entre essas duas frações, somadas a fatores como cristalinidade e morfologia dos grânulos, exercem influência direta sobre as propriedades físico-químicas e o comportamento dos materiais produzidos a partir dessa matriz. Assim, variações na razão amilose/amilopectina impactam diretamente a formação da rede polimérica e as propriedades finais dos filmes, tais como resistência mecânica, flexibilidade, interação com a água e propriedades de barreira (Santhosh et al., 2024; Rashid et al., 2026).

Nesse sentido, a avaliação comparativa entre amidos comerciais e amidos extraídos em laboratório de outras fontes permite estabelecer paralelos fundamentais entre matérias-primas de diferentes origens e históricos de processamento. A investigação detalhada dessas disparidades contribui para a compreensão de como a fonte botânica e as etapas de obtenção do amido interferem no mecanismo de gelificação, na integridade e no

desempenho final dos filmes biodegradáveis (Carvalho et al., 2024; Gonçalves et al., 2024).

Com isso, este trabalho teve como objetivo desenvolver filmes biodegradáveis utilizando quatro fontes de amido — sendo duas comerciais (milho e polvilho azedo) e duas obtidas por extração em bancada no Complexo de Laboratórios da Engenharia de Alimentos (CLEA-UFRN) (inhame e da semente de jaca), bem como caracterizar suas propriedades físico-químicas, de barreira e mecânicas, buscando elucidar o impacto da fonte e do tipo de amido no desempenho do material.

Metodologia

Foram utilizados quatro tipos de amido para o preparo das soluções formadoras de filmes biodegradáveis: amido de milho comercial (Kimimo), polvilho azedo comercial (Yoki), amido de sementes de jaca e amido de inhame. Os amidos de jaca e inhame foram obtidos por extração, conforme metodologias descritas por Miguel (2023) e Costa (2023), respectivamente.

2.1 Extração do amido da semente de jaca

A extração do amido das sementes de jaca foi realizada conforme a metodologia descrita por Miguel (2023). Inicialmente, as sementes foram descascadas manualmente com auxílio de uma faca e, posteriormente, trituradas em liquidificador industrial (Vitalex, LQI-08), em baixa velocidade, durante 5 min, utilizando solução de metabissulfito de sódio a 0,2%. A suspensão obtida foi filtrada em peneira de nylon e submetida a duas etapas de decantação, de 24 h cada, utilizando a mesma solução. O sedimento de coloração marrom formado na superfície foi removido com auxílio de uma espátula. O amido obtido foi seco em estufa de circulação de ar (Luca 82-27, Lucadema, Brasil) a 60 °C por 12 h, posteriormente moído em moinho multiuso (Tecnal, TE-631/2) e peneirado em peneira de 32 mesh. O produto obtido foi acondicionado em recipientes plásticos e armazenado sob refrigeração.

2.2 Extração do amido do inhame

A extração do amido de inhame foi baseada no método de Costa (2023). Os inhames foram descascados, cortados e imersos em solução de metabissulfito de sódio a 0,2%, na proporção de 1:2 (m/v), durante 24 h sob refrigeração a 4 °C. Após esse período, o material foi triturado em liquidificador industrial e filtrado em tecido de organza. O resíduo retido foi reprocessado, filtrado e descartado. O amido foi lavado duas vezes com solução de metabissulfito de sódio a 0,2%, com decantação e descarte do sobrenadante após cada lavagem. Em seguida, a pasta foi centrifugada a 3.000 rpm por 3 min. O amido foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 50 °C até secagem completa, triturado em moinho de facas e armazenado sob refrigeração.

2.3 Elaboração dos filmes

As soluções formadoras de filmes foram preparadas com 4% (m/v) de amido de semente de jaca, milho e inhame. Para o polvilho azedo, utilizou-se 6% (m/v), devido à necessidade de maior teor de sólidos para formação dos filmes. O glicerol foi empregado como plastificante nas concentrações de 2,0% (m/v), em relação à massa de amido, para os filmes de jaca, milho e inhame, e de 3,0% (m/v) para os filmes de polvilho azedo, conforme Lima et al. (2021), com adaptações. Inicialmente, os componentes foram dispersos em água destilada sob agitação. As suspensões foram gelatinizadas por 10 min a 95 °C para os amidos de jaca e inhame, 75 °C para o amido de milho e 70 °C para o polvilho azedo. Após o aquecimento, as soluções permaneceram em repouso até aproximadamente 50 °C e foram vertidas em placas de acrílico de 50 × 30 cm. A secagem ocorreu em estufa de circulação forçada de ar a aproximadamente 40 °C por 24 h. Posteriormente, os filmes foram avaliados quanto às propriedades físicas, mecânicas e estruturais.

2.4 Caracterização dos filmes

2.4.1 Determinação de Espessura

A espessura foi determinada com micrômetro digital Digimess, com resolução de 0,001 mm. Foram realizadas cinco medições em diferentes pontos de cada filme. Esse parâmetro foi utilizado para auxiliar na avaliação das propriedades mecânicas e da permeabilidade ao vapor de água.

2.4.2 Teor de umidade e Solubilidade em água

O teor de umidade e a solubilidade em água foram determinados em triplicata, conforme metodologia adaptada de Hosseini et al. (2009). Para o teor de umidade, amostras de 10 × 30 mm foram pesadas para obtenção da massa inicial (mi), secas em estufa a 105 °C por 24 h, resfriadas em dessecador e pesadas novamente para obtenção da massa final (mf). O teor de umidade foi calculado pela diferença entre as massas inicial e final.

Umidade (%) = mi - mfmi x 100 Eq.(1)

Onde:

mi = massa inicial

mf = massa final

Para determinação da solubilidade, as amostras foram imersas em 50 mL de água destilada por 6 h à temperatura ambiente. Em seguida, foram submetidas à secagem em estufa a 105 °C por 24 horas e pesadas após resfriamento em dessecador. A solubilidade foi calculada pela Equação 2:

Solubilidade (%) = msi - msfmsi x 100 Eq.(2)

Onde:

msi = massa seca inicial

msf = massa seca final

2.4.3 Permeabilidade ao Vapor de Água (PVA)

A permeabilidade ao vapor de água foi determinada de acordo com a norma ASTM E96/E96M-16. Foram utilizados aparatos circulares de acrílico com área de exposição de 0,00385 m², contendo aproximadamente 20 g de sílica gel. Os filmes foram mantidos em dessecador a vácuo com solução saturada de NaCl, estabelecendo gradiente de umidade relativa de 0%/75% entre o interior dos aparatos e o ambiente externo.

Os aparatos foram pesados durante dez dias, sob temperatura de 25 ± 2 °C. A taxa de permeabilidade ao vapor de água e a permeabilidade foram calculadas pelas equações correspondentes.

TPVA (gm-2dia-1) = wt a Eq.(3)

Onde:

w = ganho de massa

t = tempo

a = área de exposição da célula (m²)

PVA (g.mm.m-2 .dia-1.kPa-1) =TPVAePs(UR1-UR2) Eq.(4)

Onde:

e = espessura do filme (mm)

Ps = pressão de saturação do vapor d'água

UR1 = Umidade relativa interna a célula;

UR2= Umidade relativa do ambiente externo

2.4.4 Tensão e Deformação

A resistência à tração e a deformação dos filmes foram determinadas conforme a norma ASTM D882-02. Os filmes foram cortados em corpos de prova retangulares de 20 × 50 mm e acondicionados em dessecadores contendo solução saturada de NaCl, sob umidade relativa de 75% e temperatura de 25 ± 2 °C. Os ensaios mecânicos foram realizados em equipamento Tensolab 3000 (Mesdan, Itália), sob temperatura de 21 °C e umidade relativa de 65%. Foi utilizada distância inicial entre as garras de 75,0 mm e velocidade de ensaio de 50 mm min^{-1}.

Resultados e Discussões

3.1 Aspectos Físicos, Visual e Espessura

Durante a produção dos filmes foi observado que a formulação padrão utilizada inicialmente não estava adequada para o polvilho azedo por apresentar consistência diferente das demais. Portanto, foi necessário realizar um ajuste em específico na formulação nas concentrações de amido e plastificante para obter a consistência desejada e um tempo diferenciado de secagem em relação aos outros filmes, garantindo mais integridade e facilidade no manuseio do filme. As proporções utilizadas nas quatro formulações estão descritas na tabela 1.

Os filmes biodegradáveis produzidos apresentaram características únicas para cada tipo de amido utilizado. Os filmes de amido industrial ficaram bem consistentes, lisos e sem bolhas, especialmente o de polvilho azedo que apresentou uma característica de melhor estrutura e aparentemente maior rigidez que os demais. Os filmes produzidos com o amido extraído no laboratório tinham suas características particulares, como o amido de semente de jaca que apesar de ser liso apresentou-se translúcido. Por outro lado, nos filmes de inhame foi possível observar que ele não conseguiu ter uma superfície lisa como os demais, houve a formação de pequenas bolhas em sua estrutura e com isso, maior facilidade de ruptura durante a secagem. Os valores médios de espessura obtidos para as quatro formulações estão presentes na tabela 2.

De acordo com os resultados da tabela 2, observou-se que os filmes de amido de milho, semente da jaca e inhame apresentaram valores médios de espessuras bem próximos entre si, essa semelhança se dá pelo fato das três formulações terem sido preparadas com as mesmas concentrações. Em contrapartida os filmes produzidos com polvilho azedo apresentaram uma espessura superior, ligado diretamente a sua formulação ser diferenciada, pois o segundo descrito pot Matta et al. (2011) durante a secagem das soluções filmogênicas a água evapora permitindo uma maior concentração de amido por área formadora de rede, com isso, o teor de amido e plastificante na solução filmogênica influencia a propriedades dos filmes de maneiras distintas.

Ao confrontar esses dados com a literatura, observa-se que os resultados do presente estudo se encontram condizentes com a área de polímeros biodegradáveis, a espessura do filme de milho 0,1462 ± 0,0169 mm se encontra próximo do achados de Oliveira (2023), que obteve espessura média de 0,150 ± 0,008 mm para filmes de amido de milho com glicerol. Contudo, mostra-se superior às espessuras obtidas por Almeida (2020), que reportou valores de 0,076 ± 0,01 mm para filmes de amido de milho regular, provando como a concentração de sólidos e a técnica laboratorial influenciam o produto final. Já o amido de inhame o valor médio obtido de 0,1462 ± 0,0104 mm é idêntico ao controle de amido de inhame relatado em Costa (2023), que obteve 0,1462 ± 0,010 mm, revelando assim uma boa execução na elaboração dos filmes . Para o amido de semente de jaca a espessura encontrada de 0,1427 ± 0,0306 mm aproxima-se dos valores reportados na dissertação de Miguel (2023), de 0,110 ± 0,01 mm.

3.2 Teor de Umidade, Solubilidade em água e Permeabilidade ao vapor de água

O teor de umidade, a solubilidade em água e a permeabilidade ao vapor de água (PVA) são importantes propriedades no desenvolvimento de filmes biodegradáveis.Assim

como descrito em Costa (2023) a umidade é responsável por quantificar a água retida na matriz após a secagem. A solubilidade, a resistência do filme quando entra em contato direto com meio de elevada atividade de água e o PVA em determinar a capacidade da barreira do material em troca de umidade entre a área interna da célula e o ambiente externo. Os valores médios obtidos pelas análises das quatro formulações de filmes biodegradáveis desenvolvidos estão apresentados na tabela 3.

O teor de umidade dos filmes variou entre 27,46 ± 0,42 % e 38,49 ± 0,29 %, conforme exposto na Tabela 3. O filme formulado com amido de milho comercial exibiu o maior teor de umidade 38,49 ± 0,29 %, comportamento que está ligado diretamente com o caráter pegajoso observado logo após a sua secagem e remoção das placas de acrílico, mas ao comparar esses resultado com a literatura, observou que Almeida (2020) encontrou um teor de umidade de 29,06 ± 0,01 % para o seu filme controle de amido de milho. Essa diferença é atribuída à variação na proporção de plastificante e amido utilizada em ambos os estudos ou diferença de marcas utilizadas. Entretanto, os filmes de polvilho azedo apresentaram a menor umidade residual ao final do processo, comportamento diretamente associado ao seu método de obtenção por fermentação natural e secagem solar. Conforme apontado por Machado et al. (2010), essa matéria-prima comercial apresenta teor de umidade de aproximadamente 14%, valor próximo do limite máximo de umidade, de acordo com a RDC Nº 711, de 1° de Julho de 2022. Esse teor inicial elevado, somado à água adicionada na formulação, justifica o maior tempo de secagem exigido em estufa para a evaporação completa. As formulações contendo amidos extraídos em laboratório exibiram valores aproximados. O filme de amido de semente de jaca apresentou 29,77 ± 0,19 % de umidade, resultado em consonância com Miguel (2023), que relatou teor de 29,4 ± 1,39 % para filmes controle de mesma natureza. Para o filme de amido de inhame, registrou 32,96 ± 0,60 % de umidade, valor próximo do relatado por Costa (2023), que encontrou umidade de 30,19 ± 0,23 % para filme controle de amido de inhame.

Todas as formulações analisadas apresentaram valores elevados de solubilidade em água , mostrando assim, que perderam a sua integridade física após as 6 horas de imersão em água destilada e posterior secagem por 24 horas. Essa propriedade característica é esperada para filmes biodegradáveis compostos apenas por amido, glicerina e água destilada.

A permeabilidade ao vapor de água é fundamental para caracterizar a capacidade dos filmes de permitir a passagem do vapor de água através de sua estrutura, tal experimento é influenciado de forma direta pela espessura, estrutura, tempo, temperatura e umidade do ambiente. Dentre as amostras analisadas foi observado a variação entre 5,79 ± 0,21 g.mm/m².dia.kPa e 14,26 ± 0,54 g.mm/m².dia.kPa . O valor para o filme de amido de inhame que apresentou o menor valor de PVA, esse comportamento de barreira é atribuído aos teores de amilose relatados por Costa (2023), que foram de 34,28% para o amido de inhame e de 31,03% para o amido da semente de jaca. Entretanto, o filme de polvilho azedo exibiu a maior taxa de permeabilidade ao vapor de água, o que representou o menor desempenho de barreira ao vapor d'água. Esse comportamento é explicado pelos fatores de espessura e maior uso de plastificante na formulação, conforme detalhado na Tabela 1. A fermentação e a secagem ao sol do polvilho azedo provocam a despolimerização e a hidrólise parcial das cadeias de amilose e amilopectina, resultando na redução da massa molar média e da viscosidade intrínseca do polímero, conforme descrito por Marcon (2009).

Foi possível observar com as formulações em porcentagem as três soluções formadoras de filme permitiu a obtenção de espessuras uniformes para as fontes de milho, semente de jaca e inhame, com aproximadamente 0,14 mm. Como a formulação do polvilho azedo demandou ajustes dos sólidos totais e consequentemente da água resultou em uma espessura média maior que as demais, com 0,215 mm.

3.3 Tensão e Deformação

A tensão e deformação são propriedades para determinar a capacidade estrutural, física e de desempenho durante seu manuseio. A resistência à tração, apresentada como tensão máxima de ruptura, quantifica a força limite que o filme suporta antes de se romper, já o deformação na ruptura avalia a capacidade de deformação e estiramento elástico. Os valores médios de tensão e alongamento obtidos para as quatro formulações desenvolvidas estão apresentados na tabela 4.

Para melhor visualização do comportamento e a comparação dos perfis de resistência e elasticidade entre os amidos, os dados experimentais foram plotados graficamente, conforme ilustrado nas figuras 1 e 2.

Os resultados mecânicos revelaram perfis distintos e consistentes com as características de cada fonte. Os filmes elaborados com os amidos extraídos em laboratório apresentaram menor flexibilidade com alongamentos abaixo de 20%, entretanto o filme de amido de inhame destacou-se por apresentar a maior resistência à tração da série analítica, atingindo uma tensão máxima de 3,75 ± 0,15 MPa. Os filmes de amido de semente de jaca mostraram tensão máxima de 2,06 ± 0,09 MPa e deformação de 18,74 ± 1,42 %. Esse resultado é uma concordância com os valores apresentados em Miguel (2023), que obteve valores de tensão de 2,34 ± 0,78 MPa e 16,45 ± 5,49 % para alongamento.

O amido comercial de milho apresentou o segundo melhor valor de tensão máxima 3,15 ± 0,20 MPa combinado com a maior taxa de alongamento de 41,93 ± 3,65 %. Ao comprar esses valores com os dados de tensão máxima de Almeida (2020) para filmes controle de milho regular, 3,99 ± 0,36 MPa, observa-se proximidade de comportamento, apesar das diferenças das proporções e marca de amido

Os filmes de polvilho azedo exibiram tensão máxima de 2,35 ± 0,02 MPa e alongamento de 37,56 ± 1,96 %. Isso decorre da alta concentração de glicerina incorporada. Conforme dito por Hosseini et al. (2009) e Mali et al. (2010), o glicerol é uma molécula hidrofílica que penetra na malha do amido, reduzindo as forças de atração intermolecular e abrindo o espaço livre das cadeias. Esse fenômeno, melhora consideravelmente a flexibilidade e o alongamento da película, mas por outro lado reduz a sua resistência à tração devido ao menor número de interações na rede polimérica tridimensional. Apesar da diferente formulação, os valores do polvilho se encontram próximos dos outros biopolímeros, apresentando um comportamento padrão.

Conclusão

O desenvolvimento e a caracterização físico-química das formulações desenvolvidas de filmes biodegradáveis por casting, permitiram avaliar o potencial tecnológico dos amidos trabalhados, sejam eles comerciais ou não convencionais, extraídos em laboratório. Após as análises foi possível observar que as quatro matrizes trabalhadas são aplicáveis, apesar de cada uma conter sua singularidade, pois é possível observar que a origem e o histórico de processamento do biopolímero determinam diretamente as propriedades físicas e mecânicas do produto final.

Entre os amidos extraídos em laboratório, a matriz de inhame destacou-se pelo desempenho, exibindo a menor permeabilidade ao vapor de água apesar de ser um filme com pequenas bolhas características, também apresentou a maior resistência à tração. O amido de semente de jaca configurou-se como uma alternativa sustentável promissora para o aproveitamento de subprodutos agroindustriais, gerando filmes homogêneos, de fácil manuseio, translúcidos e com menor solubilidade em água que os demais. O filme de amido de milho comercial apresentou o melhor equilíbrio de flexibilidade e manuseabilidade, apesar de seu aspecto mais úmido ao ser retirado da placa ele teve o maior alongamento para deformação na ruptura. Entretanto, o polvilho azedo evidenciou o impacto das modificações estruturais geradas pela fermentação natural, as quais reduziram a coesão da rede polimérica, resultando no menor teor de umidade residual, mas na maior taxa de permeabilidade ao vapor d'água, além de apresentar ótimas características sensoriais, um filme com aparência firme, lisa de fácil manuseio tanto como solução como filme.

Portanto, os resultados obtidos são uma oportunidade para análises futuras, como a possibilidade do desenvolvimento de misturas combinando as diferentes matrizes e possíveis aplicações visando avaliar o aproveitamento de produto agroindustriais à otimização da flexibilidade e aparência dos filmes biodegradáveis, além da possibilidade de blends com outras matrizes poliméricas.

Referências

1. ALMEIDA, Vanessa Soltes de. Produção e caracterização de filmes biodegradáveis de amido de milho regular e ceroso reforçados com nanocelulose de eucalipto. 2020. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Pró-Reitoria de Pesquisa e de Pós-Graduação, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2020.
2. AMOBONYE, A. et al. Recent advances in starch-based biodegradable films for food packaging applications: challenges, modifications, and future prospects. Carbohydrate Polymers, v. 348, p. 122-137, 2025. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.144354.
3. ASTM, ASTM E96 / E96M-16, Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, 2016; 1–14. DOI: 10.1520/E0096_E0096M-16
4. ASTM INTERNATIONAL. Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting: ASTM D882-02. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2002. DOI: 10.1520/D0882-02.

5. BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 711, de 1º de julho de 2022. Dispõe sobre os requisitos sanitários dos amidos, biscoitos, cereais integrais, cereais processados, farelos, farinhas, farinhas integrais, massas alimentícias e pães. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 126, p. 183, 6 jul. 2022. Disponível em: https://anvisalegis.datalegis.net/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&num_ato=00000711&sgl_tipo=RDC&sgl_orgao=RDC/DC/ANVISA/MS&vlr_ano=2022&seq_ato=002&cod_modulo=310&cod_menu=8542. Acesso em: agosto de 2026.
6. CARVALHO, A. J. F. et al. Comparative study between commercial and lab-extracted starches for the development of biopolymeric matrices. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 34, n. 2, e20240015, 2024. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109020.
7. COSTA, Eliane de Sousa. Desenvolvimento de filmes antimicrobianos à base do amido de semente de jaca e inhame incorporados com óleo essencial de canela cássia. 2023. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2023.
8. GONÇALVES, R. C. et al. Influência do histórico de processamento e extração de amidos não convencionais na formação de filmes poliméricos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 28, n. 5, p. 412-420, 2024. DOI: 10.3390/agriculture14030453
9. HOSSEINI, M. H.; RAZAVI, S. H.; MOUSAVI, M. A. Antimicrobial, physical and mechanical properties of chitosan-based films incorporated with thyme, clove and cinnamon essential oils. Journal of Food Processing and Preservation, v. 33, n. 6, p. 727-743, 2009. DOI: 10.1111/j.1745-4549.2008.00307.x
10. MALI, Suzana; GROSSMANN, Maria Victória Eiras; YAMASHITA, Fábio. Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 31, n. 1, p. 137-155, jan./mar. 2010.
11. MARCON, Maria Janete Angeloni. Proposta para o mecanismo de expansão do polvilho azedo com base nas características físico-químicas. 2009. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009
12. MATTA JUNIOR, M. D. da; SARMENTO, S. B. S.; SARANTÓPOULOS, C. I. G. L.; ZOCCHI, S. S. Propriedades de barreira e solubilidade de filmes de amido de ervilha associado com goma xantana e glicerol. Polímeros, v. 21, n. 1, p. 67–72, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000011.
13. MIGUEL, Thaís Bezerra Veríssimo. Desenvolvimento de filmes biodegradáveis a partir do amido da semente de jaca (Artocarpus heterophillus Lam.) com a incorporação de resíduo de acerola (Malphigia ermaginata). 2023. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2023.
14. OLIVEIRA, Vitória Cardoso F.. Desenvolvimento de filme biodegradável a partir de amido de milho Zea Mays L. 2023. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Câmpus Goiânia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, GO, 2023.
15. SANTHOSH, K. et al. Natural biopolymers for sustainable food packaging: structural characteristics, barrier properties, and biodegradability. Trends in Food Science & Technology, v. 145, p. 104-118, 2024. DOI: 10.1039/D3FB00211J.

16. SINGH, P. Renewable biopolymers in eco-friendly packaging: starch source availability, extraction techniques, and film-forming capacity. Journal of Cleaner Production, v. 430, p. 139-152, 2024. DOI: 10.1177/09673911241305184.
17. RASHID, S. et al. Structural organization of amylose and amylopectin in starch films: effects on water vapor permeability and mechanical integrity. Food Hydrocolloids, v. 160, p. 110-124, 2026. DOI: 10.1016/j.foodchem.2026.149279

Anexos



Tabela 1 - Proporções (%, m/m) dos componentes utilizados no preparo das soluções filmogênicas a partir de diferentes fontes de amido



Tabela 2 - Valores médios de espessura dos filmes biodegradáveis obtidos das diferentes fontes de amido



Tabela 3 - Teor de umidade, solubilidade e permeabilidade ao vapor d'água (PVA) dos filmes biodegradáveis obtidos a partir de distintas fontes de amido.



Tabela 4. Propriedades mecânicas: Tensão e Alongamento na Ruptura para os filmes biodegradáveis obtidos a partir de distintas fontes de amido.



Figura 1 - Comportamento mecânico dos filmes originados das formulações usando amido de milho e polvilho azedo



Figura 2 - Comportamento mecânico dos filmes originados das formulações usando amido de inhame e amido da semente da jaca.



Equações ultilizadas no desenvolvimento do trabalho

CÓDIGO: SB1242

AUTOR: JOÃO PEDRO DOS SANTOS ALMEIDA

COAUTOR: ADRIANO HENRIQUE DO NASCIMENTO RANGEL

COAUTOR: LUIS MEDEIROS DE LUCENA

COAUTOR: ALLYSSON MASTRÂNGELO TEIXEIRA ARAUJO DE FREITAS

ORIENTADOR: MARCIA REGINA DA SILVA PEDRINI

TÍTULO: Desenvolvimento e Validação Analítica de um Software de Análise de Proteína Aplicável para Smartphones

Resumo

O leite bovino é fonte relevante de proteínas de alta qualidade, e o monitoramento desse parâmetro é essencial para a qualidade do produto. Em ambientes rurais, a falta de infraestrutura laboratorial dificulta análises rápidas. Este trabalho propõe um método de determinação do teor de proteína em leite cru por colorimetria digital, associando a reação de biureto ao processamento de imagens em ambiente desktop. As ligações peptídicas das proteínas reagem com íons cobre (Cu^{2+}) em meio alcalino, formando um complexo violeta cuja intensidade de cor, extraída em escala RGB, é proporcional à concentração proteica. Foi desenvolvido um software em Python capaz de calibrar o sistema, capturar e processar imagens e estimar a concentração de proteína a partir de curva analítica. A validação comparou os resultados do método desktop com os obtidos por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), utilizada como referência. As médias de concentração encontradas foram próximas entre as técnicas (FTIR = 3,04%; desktop = 3,03%), com viés de -0,013, linearidade de 0,956, limite de detecção de 0,026% e limite de quantificação de 0,080%, indicando boa concordância entre os métodos. Os resultados sugerem que a colorimetria digital é uma alternativa simples, acessível e de baixo custo para o monitoramento do teor de proteína no leite cru, com potencial de aplicação em propriedades rurais e laticínios de pequeno porte.

Palavras-chave: Leite. Proteína. Biureto. Colorimetria digital. Spot test.

TITLE: Determination of protein content in raw bovine milk by digital colorimetry based on the biuret reaction in a desktop environment

Abstract

Bovine milk is a relevant source of high-quality protein, and monitoring this parameter is essential to product quality. In rural settings, the lack of laboratory infrastructure hinders rapid analysis. This work proposes a method to determine the protein content of raw milk by digital colorimetry, combining the biuret reaction with image processing in a desktop environment. Peptide bonds of proteins react with copper ions (Cu^{2+}) in an alkaline medium, forming a violet complex whose color intensity, extracted on the RGB scale, is proportional to protein concentration. Python software was developed to calibrate the system, capture and process images, and estimate protein concentration from an analytical curve. Validation compared the desktop method with Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), used as reference. Mean concentrations were similar between techniques (FTIR = 3.04%; desktop = 3.03%), with bias of -0.013, linearity of 0.956, detection limit of 0.026%, and quantification limit of 0.080%, indicating good agreement between methods. Results suggest that digital colorimetry is a simple, accessible, and low-cost alternative for monitoring protein content in raw milk, with potential application on farms and small-scale dairies.

Keywords: Milk. Protein. Biuret. Digital colorimetry. Spot test.

Introdução

O leite é um alimento fundamental na dieta humana, fornecendo nutrientes essenciais como proteínas de alta qualidade, carboidratos, cálcio, potássio e vitaminas A, D, B2 e B12. Esses nutrientes são importantes desde os primeiros meses de vida, contribuindo para o desenvolvimento ósseo, muscular, metabólico e imunológico (WHO, 2023). O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de leite. Em 2023, a produção nacional foi de aproximadamente 25,2 bilhões de litros (IBGE, 2023). Além do valor nutricional, a cadeia produtiva do leite gera empregos e renda em áreas rurais e urbanas, movimentando indústrias de laticínios, transporte e comércio (SANTOS et al., 2020). Estima-se que o setor tenha gerado cerca de 4 milhões de empregos diretos e indiretos no país (IBGE, 2023). Entre os componentes do leite cru, a proteína merece destaque por sua relevância nutricional e comercial. O leite bovino apresenta, em média, de 3,3 a 3,5% de proteínas totais (MEHTA, 2015), sendo a caseína responsável por cerca de 80% desse total e as proteínas do soro pelos 20% restantes (DAVOODI et al., 2016). O monitoramento desse parâmetro é exigido por normas oficiais, que estabelecem teor mínimo de 2,9% de proteína no leite cru refrigerado (BRASIL, 2018). Apesar de sua importância, a determinação do teor de proteína em ambientes rurais enfrenta desafios, como a falta de infraestrutura laboratorial, o custo de equipamentos e a dificuldade logística de enviar amostras a laboratórios distantes (KUNES et al., 2021). Nesse contexto, técnicas analíticas simples, portáteis e de baixo custo tornam-se alternativas relevantes para o monitoramento da qualidade do leite diretamente na propriedade rural ou no laticínio. A colorimetria digital, associada ao processamento de imagens, vem sendo cada vez mais explorada como ferramenta analítica em diferentes áreas, como agropecuária, nutrição e saúde (HUANG et al., 2024). Essa abordagem converte a intensidade de cor de uma reação química, capturada por câmera digital ou smartphone, em valores numéricos na escala RGB, que podem ser correlacionados à concentração de um analito de interesse (SOUZA et al., 2020). Um método químico clássico para a determinação de proteínas é a reação de biureto, na qual as ligações peptídicas presentes nas proteínas reagem com íons de cobre (Cu^{2+}) em meio alcalino, formando um complexo de coordenação de coloração violeta, cuja intensidade é proporcional à

concentração de proteína (GORNALL et al., 1949). A associação dessa reação à colorimetria digital permite substituir a leitura espectrofotométrica tradicional por uma análise de imagem, tornando o método mais simples e acessível. Diante disso, este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar um método de determinação do teor de proteína em leite cru bovino, baseado na reação de biureto associada ao processamento digital de imagens em ambiente desktop, comparando os resultados obtidos com os de uma técnica analítica de referência, a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

Metodologia

Preparação das amostras: amostras de leite cru foram suplementadas com albumina de soro bovino (grau analítico) em concentrações de proteína entre 2,0% e 4,0%, homogeneizadas em agitador tipo vórtex. As concentrações reais foram confirmadas por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), utilizada como método de referência. Reação de biureto: uma alíquota de cada amostra recebeu solução de biureto, desenvolvendo coloração violeta proporcional à concentração de proteína. Em tubo de ensaio, 8 mL de leite cru foram misturados a 2 mL de solução de biureto e homogeneizados. Estudo cinético: para definir o tempo ideal entre a adição do reagente e a leitura, amostras com 2,0%, 2,5%, 3,0%, 3,5% e 4,0% de proteína foram fotografadas a cada 30 segundos, por 5 minutos, avaliando-se a estabilidade da cor na escala RGB ao longo do tempo. Captura e processamento de imagens: após o tempo de reação definido no estudo cinético, o tubo com a amostra foi posicionado em um protótipo de captura e fotografado. A imagem foi carregada em um software desenvolvido em Python (versão 3.11, IDE PyCharm), utilizando as bibliotecas OpenCV, NumPy, Matplotlib, SciPy, Tkinter e Pickle. O software extrai os valores médios dos canais RGB da imagem e calcula a absorbância pela equação $A = -\log(I_{rgb}/I_{branco,rgb})$, em que I_{rgb} é o valor médio do canal (R, G ou B, ou a média dos três) na amostra e $I_{branco,rgb}$ é o valor correspondente obtido no branco. O programa possui arquitetura modular, com rotinas de pré-processamento de imagens, ajuste de curva de calibração (concentração versus log da razão RGB), salvamento e carregamento de parâmetros por serialização (pickle), análise de novas imagens e plotagem dos dados experimentais e da curva ajustada. Na interface do usuário, é possível calibrar o sistema com imagens de referência, analisar uma nova imagem para estimar a concentração de proteína e visualizar a curva de calibração. O programa foi compilado como executável para uso em sistema operacional Windows. Validação analítica: seguindo as diretrizes do INMETRO (DOQ-CGCRE-008) e do EURACHEM/CITAC (2014), foram avaliadas as seguintes figuras de mérito: linearidade, calculada pelo coeficiente de correlação (R) da regressão linear entre sinal RGB e concentração; desvio padrão (s) e desvio padrão relativo (DPR) dos resultados; exatidão, pelo erro relativo (ER) entre o valor obtido e o valor de referência; limite de detecção (LD = 3,3s/a) e limite de quantificação (LQ = 10s/a), em que a é o coeficiente angular da curva analítica; recuperação percentual; e precisão, avaliada por repetibilidade (mesmo operador, mesma amostra, mesmas condições) e reprodutibilidade (diferentes dias, operadores e equipamentos), ambas expressas como coeficiente de variação (CV), sendo o método considerado preciso para CV inferior a 5%. A robustez do sistema foi avaliada em diferentes aparelhos smartphone. Os resultados do método desenvolvido em ambiente desktop foram comparados estatisticamente aos obtidos por FTIR, por meio de análise de variância de fator único

(ANOVA, 5% de probabilidade) e, quando pertinente, teste de Tukey (5% de significância), além do cálculo do viés (bias) entre as técnicas.

Resultados e Discussões

Desenvolvimento do software de colorimetria Foi desenvolvido, em linguagem Python, um software para desktop com o objetivo de calibrar o sistema, processar as imagens da reação de biureto e estimar a concentração de proteína no leite cru. O programa foi estruturado em módulos independentes, o que facilita sua manutenção e futura adaptação para uso em smartphone. O módulo de pré-processamento realiza a leitura e a normalização das imagens capturadas, preparando-as para a extração dos valores RGB. O módulo de ajuste de curva relaciona a concentração de proteína ao logaritmo da razão entre os valores RGB da amostra e do branco, gerando a curva analítica do método. O módulo de salvamento e carregamento de parâmetros utiliza serialização por pickle, permitindo reaproveitar uma calibração já realizada sem repetir todo o processo. O módulo de análise de imagens permite ao usuário selecionar uma nova fotografia e obter automaticamente a concentração estimada de proteína, enquanto o módulo de plotagem exibe os dados experimentais junto à curva ajustada, favorecendo a interpretação visual dos resultados (Anexos, Figuras 1 a 3). Na interface voltada ao usuário final, quatro funções principais estão disponíveis: calibração do sistema a partir de imagens de referência, análise de uma nova imagem com estimativa de concentração de proteína, visualização gráfica da curva de calibração e encerramento do programa (Anexos, Figuras 1 a 3). Ao final do desenvolvimento, o software foi compilado como um arquivo executável para o sistema operacional Windows, o que dispensa a necessidade de instalação de ambiente Python pelo usuário final e simplifica sua aplicação prática em laticínios e propriedades rurais. Um exemplo de uso do programa é apresentado no fluxo de análise (Anexo, Figura 3): a partir da imagem capturada da reação de biureto, o usuário seleciona a opção “Analisar” no menu do software, e o sistema retorna diretamente o teor estimado de proteína, como no exemplo ilustrado, em que uma amostra reagida resultou em concentração estimada de 3,08%. Esse resultado é obtido em poucos segundos, o que demonstra a agilidade do método frente às análises laboratoriais convencionais, com maior tempo de resposta. Curva de calibração e figuras de mérito A curva analítica obtida relacionando a concentração de proteína (%) ao logaritmo da razão entre o parâmetro RGB da amostra e do branco apresentou a equação $y = 0{,}0395x + 0{,}0519$, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9933 (Anexos, Figura 2). Esse valor indica forte relação linear entre o sinal colorimétrico e a concentração de proteína na faixa estudada (2,0% a 4,5%), sustentando o uso da escala RGB como sinal analítico para essa finalidade. As figuras de mérito calculadas para o método desenvolvido em ambiente desktop estão resumidas na Tabela 2. A linearidade obtida ($R = 0{,}956$) atendeu ao critério recomendado ($R > 0{,}90$) segundo as diretrizes do INMETRO (DOQ-CGCRE-008) e do EURACHEM/CITAC (2014). O limite de detecção (LD) foi de 0,026% e o limite de quantificação (LQ) foi de 0,080% de proteína, valores que indicam boa sensibilidade do método para a faixa de concentração usualmente encontrada no leite cru bovino (2,9% a 3,8%, conforme BRASIL, 2018). O valor de p obtido (0,062) foi superior a 0,05, sugerindo ausência de diferença estatisticamente significativa entre os métodos comparados. A proporção de valores discrepantes (outliers) foi de 2,4%, abaixo do limite de 5% considerado aceitável. Comparação entre o método desktop e a técnica de referência (FTIR) Foram comparadas 66 leituras pareadas entre o método desenvolvido e a técnica de referência,

FTIR (Anexos, Figura 4). A média de concentração de proteína obtida por FTIR foi de 3,04%, enquanto o método desktop apresentou média de 3,03%, com medianas praticamente idênticas (3,04% e 3,03%, respectivamente). Os desvios padrão foram semelhantes entre as técnicas (0,23 para FTIR e 0,22 para o método desktop), assim como os coeficientes de variação (7,58% e 7,72%, respectivamente), ambos abaixo do limite de 10% frequentemente adotado como referência de precisão em métodos colorimétricos aplicados a matrizes alimentares (Tabela 3). O viés global (bias) entre os métodos foi de -0,013, indicando uma discreta subestimação da concentração de proteína pelo método desktop em relação ao FTIR, porém de magnitude pequena e sem relevância prática para o monitoramento de rotina. A análise gráfica comparativa entre as leituras (Anexos, Figura 4) mostra que as curvas dos dois métodos acompanham o mesmo padrão de variação ao longo das amostras, inclusive nos pontos de menor concentração, o que reforça a concordância entre as técnicas. A análise do viés por faixa de concentração (Tabela 4) mostrou que os desvios permaneceram pequenos em todas as faixas avaliadas, sem tendência clara de superestimação ou subestimação em função da concentração. Na faixa de 2,5% a 3,0%, concentrada a maior parte das amostras (n = 32), o viés percentual foi de 2,39%, e na faixa de 3,0% a 3,5% (n = 46, faixa mais representativa do conjunto), o viés foi de apenas 2,11%. Esses resultados sugerem que o método mantém desempenho estável na faixa de concentração de proteína tipicamente observada no leite cru bovino. Discussão Os resultados obtidos estão de acordo com estudos anteriores que aplicaram a colorimetria digital como alternativa a métodos analíticos convencionais em matrizes lácteas. Silva e Rocha (2020) descreveram o uso de colorimetria digital por smartphone para detecção de adulteração do leite por meio da determinação de proteína, obtendo boa correlação entre o sinal de cor e a concentração do analito, resultado semelhante ao coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9933$) encontrado neste trabalho. Da mesma forma, Costa et al. (2020) validaram ensaios colorimétricos associados à análise de imagem por smartphone para quantificação de adulterantes no leite, reforçando a viabilidade dessa abordagem para o controle de qualidade do produto. A boa concordância entre o método desktop e o FTIR, evidenciada pelo viés próximo de zero e pelos coeficientes de variação inferiores a 10%, indica que a colorimetria digital associada à reação de biureto pode ser empregada como triagem rápida do teor de proteína, sobretudo em locais sem acesso a equipamentos espectroscópicos. Deve-se destacar, contudo, que o método desenvolvido não substitui integralmente técnicas oficiais de referência, mas se posiciona como ferramenta complementar de triagem, especialmente útil em ambientes rurais e em laticínios de pequeno porte, conforme já discutido por Kunes et al. (2021) em relação às limitações de tecnologias analíticas convencionais nesse contexto. Desafios e limitações do método Durante o desenvolvimento do trabalho, foram identificados fatores que podem influenciar a leitura colorimétrica e que devem ser considerados em aplicações futuras do método. O tempo de armazenamento do leite cru pode favorecer a degradação enzimática da caseína, com quebra em peptídeos menores ou aminoácidos livres, alterando a estrutura e a funcionalidade da proteína, incluindo sua solubilidade e capacidade de coagulação, o que pode interferir na intensidade da cor formada na reação de biureto. Variações de pH também são relevantes: a acidificação do leite favorece a precipitação da caseína por coagulação, afetando a solubilidade da amostra e, consequentemente, a leitura colorimétrica. A ação térmica, por sua vez, pode causar desnaturação proteica, modificando a estrutura da proteína e potencialmente alterando a resposta de cor observada. Esses fatores reforçam a importância de padronizar a condição da amostra, como o tempo entre a coleta e a análise, a temperatura e a manipulação prévia, para garantir a repetibilidade e a confiabilidade do método em

condições reais de uso. Outro ponto a ser considerado é a influência de variáveis ambientais na captura da imagem, como a iluminação do ambiente, o ângulo e a distância entre a câmera e a amostra. O controle dessas variáveis é importante para a transposição do método do ambiente desktop. De modo geral, os resultados obtidos até o momento indicam que a associação entre a reação de biureto e o processamento digital de imagens constitui uma alternativa promissora, simples e de baixo custo, para a estimativa do teor de proteína em leite cru bovino, com desempenho analítico comparável ao de uma técnica de referência consolidada.

Conclusão

O presente trabalho demonstrou a viabilidade de determinar o teor de proteína em leite cru bovino por meio de colorimetria digital associada à reação de biureto, em ambiente desktop. O software desenvolvido em Python permitiu calibrar o sistema, capturar e processar imagens e estimar a concentração de proteína de forma rápida, a partir de uma curva analítica construída na escala RGB ($R^2 = 0,9933$). A validação do método, realizada por comparação com a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), mostrou boa concordância entre as técnicas, com médias de concentração semelhantes (FTIR = 3,04%; desktop = 3,03%), viés reduzido (-0,013) e figuras de mérito satisfatórias, como linearidade de 0,956, limite de detecção de 0,026% e limite de quantificação de 0,080%, todos compatíveis com os critérios recomendados pelo INMETRO e pelo EURACHEM/CITAC. Esses resultados indicam que o método proposto é uma alternativa simples, rápida e de baixo custo para o monitoramento do teor de proteína no leite cru, com potencial de aplicação em propriedades rurais e laticínios que não dispõem de infraestrutura para análises espectroscópicas convencionais. Como recomendação para próximas etapas da pesquisa, sugere-se a adaptação e a validação do método para uso direto em smartphone, considerando as condições de iluminação, distância e ângulo de captura identificadas no planejamento fatorial realizado neste estudo, além da ampliação dos ensaios de repetibilidade, reprodutibilidade e robustez em diferentes equipamentos e condições de campo. Também é recomendável avaliar o efeito de fatores como tempo de armazenamento, variação de pH e temperatura da amostra sobre a resposta colorimétrica, de modo a consolidar o método como ferramenta confiável de triagem para o controle de qualidade do leite cru.

Referências

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 76, de 26 de novembro de 2018. Regulamentos técnicos que fixam a identidade e as características de qualidade do leite cru refrigerado, leite pasteurizado e leite pasteurizado tipo A. Diário Oficial da União, Brasília, 30 nov. 2018. COSTA, R. A.; MORAIS, C. L. M.; ROSA, T. R.; FILGUEIRAS, P. R. et al. Quantification of milk adulterants (starch, H2O2, and NaClO) using colorimetric assays coupled to smartphone image analysis. Microchemical Journal, v. 156, 104968, 2020. DAVOODI, S. H.; SHAHBAZI, R.; ESMAEILI, S. et al. Health-related aspects of milk proteins. Iranian Journal of Pharmaceutical Research, v. 15, n. 3, p. 573-591, 2016. EURACHEM/CITAC. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. 3. ed.

Eurachem, 2014. GORNALL, A. G.; BARDAWILL, C. J.; DAVID, M. M. Determination of serum proteins by means of the biuret reaction. Journal of Biological Chemistry, v. 177, p. 751-766, 1949. HUANG, L.; YAO, C.; ZHANG, L. Enhancing computer image recognition with improved image algorithms. Scientific Reports, v. 14, 13709, 2024. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Trimestral do Leite. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br. Acesso em: 26 ago. 2026. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). DOQ-CGCRE-008: Orientação sobre validação de métodos analíticos. Rio de Janeiro: INMETRO, 2020. KUNES, R.; BARTOS, P.; IWASAKA, G. K. et al. In-line technologies for the analysis of important milk parameters during the milking process: a review. Agriculture, v. 11, n. 3, 239, 2021. MAROUBO, L. A.; PEDRINA, G.; MELCHERT, W. R. Total sulfonamides determination in bovine milk using smartphone-based digital images. Microchemical Journal, v. 170, 106657, 2021. DOI: 10.1016/j.microc.2021.106657. MEHTA, B. M. Chemical composition of milk and milk products. In: CHEUNG, P.; MEHTA, B. (eds.). Handbook of Food Chemistry. Berlin: Springer, 2015. RATENI, G.; DARIO, P.; CAVALLO, F. Smartphone-based food diagnostic technologies: a review. Sensors, v. 17, n. 6, 1453, 2017. SANTOS, I.; JÚNIOR, J. O.; DIAS, B.; MENDES, L.; BARBON, A. Perfil do consumidor brasileiro e hábitos de consumo de leite e derivados. Archives of Veterinary Science, v. 25, n. 2, 2020. SILVA, A. F. S.; ROCHA, F. R. P. A novel approach to detect milk adulteration based on the determination of protein content by smartphone-based digital image colorimetry. Food Control, v. 115, 107299, 2020. SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. Fundamentals of Analytical Chemistry. 9. ed. Singapore: Cengage Learning, 2014. SOUZA, D. L.; FERREIRA, J. C.; FERREIRA, I. Image recording and processing chemical synthesis: method description and demonstration. Chemistry Methods, v. 1, 2020. WHO. World Health Organization. Guideline for complementary feeding of infants and young children 6-23 months of age. Geneva: WHO, 2023.

Anexos



Tabela 2. Figuras de mérito do método de colorimetria digital em ambiente desktop.



Tabela 3. Estatística descritiva das concentrações de proteína (%) obtidas por FTIR e pelo método desktop.



Tabela 4. Viés (bias) do método desktop em relação ao FTIR, por faixa de concentração de proteína.



Figura 1 – Módulo de escolhapré-processamento de imagens.



Figura 2 – Módulo de ajuste de curva de calibração.



Figura 3 – Módulo de análise de imagens.



Figura 4 – Comparativo gráfico entre os resultados obtidos por FTIR e pelo método desktop (66 amostras).



Figura 5 – Coloração desenvolvida em amostra de leite pelo método de Biureto



Figura 6 – Amostras de leite coagulado que influencia a leitura colorimétrica das amostras.

CÓDIGO: SB1743

AUTOR: LARYSSA SILVA DO NASCIMENTO

ORIENTADOR: KATYA ANAYA JACINTO SCATTONE

TÍTULO: Atividade antioxidante de extratos de melão amarelo e melão cantaloupe

Resumo

As sementes de melão constituem subprodutos com potencial de aproveitamento devido à presença de constituintes bioativos. Estudo teve como objetivo avaliar a atividade antioxidante de extratos aquosos de sementes de melão Amarelo e Cantaloupe (Cucumis melo L.). Os extratos previamente obtidos foram congelados, liofilizados e reconstituídos em água para realização das análises. Foram determinados os compostos fenólicos totais (CFT) e a atividade antioxidante pelos métodos ABTS e DPPH. O melão Amarelo apresentou maior teor médio de CFT (8,800 ± 0,6279 mg EAG/g de extrato seco) em comparação ao Cantaloupe (4,7646 ± 0,3067 mg EAG/g. Para o ABTS, os valores foram próximos: 1,2541 ± 0,4479 e 1,2838 ± 0,1266 µmol TE/g para Amarelo e Cantaloupe, respectivamente. No DPPH, o Cantaloupe apresentou maior resposta média (4,8333 ± 1,0346 µmol TE/g) que o Amarelo (2,1489 ± 0,5089 µmol TE/g). Os resultados evidenciaram comportamentos distintos entre os extratos conforme o método empregado, reforçando o potencial de valorização das sementes de melão como subproduto.

Palavras-chave: Cucumis melo var inodorus. Cucumis melo var cantalupensis. Melão.

TITLE: ANTIOXIDANT ACTIVITY OF YELLOW MELON AND CANTALOUPE MELON EXTRACTS

Abstract

Melon seeds are by-products with potencial for valorization due to the presence of bioactive constituents. This study aimed to evaluate the antioxidant activity of aqueous extracts from Yellow and Cantaloupe melon (Cucumis melo L.) seeds. The previously obtained extracts were frozen, freeze-dried, and reconstituted in water for analysis. Total phenolic compounds (TPC) and antioxidant activity by ABTS and DPPH assays were determined. Yellow showed a higher mean TPC (8.800 ± 0.6279 mg GAE/g dry extract) than Cantaloupe (4.7646 ± 0.3067 mg GAE/g. ABTS values were similar: 1.2541 ± 0.4479 e 1.2838 ± 0.1266 µmol TE/g for Yellow and Cantaloupe melon, respectively. In the DPPH assay, Cantaloupe showed a higher mean response (4.8333 ±

1.0346 µmol TE/g) than Yellow melon (2.1489 ± 0.5089 µmol TE/g). The results showed distinct behavior between the extracts according to the assay used, supporting the potential valorization of melon seeds as a by-product.

Keywords: Cucumis melo var inodorus. Cucumis melo var cantalupensis. Melon.

Introdução

O melão Cucumis melo L., pertencente à família Cucurbitaceae, apresenta ampla diversidade de variedades e constitui uma cultura de importância alimentar e econômica. Entre os tipos comercialmente relevantes encontram-se o melão Amarelo, pertencente ao grupo inodorus, e o Cantaloupe, pertencente ao grupo cantalupensis, caracterizado pela casca rendilhada e polpa geralmente alaranjada. No Brasil, a produção de melão apresenta expressiva importância econômica, especialmente na região Nordeste, com destaque para os estados do Rio Grande do Norte e Ceará (Barreto, 2011). Além da polpa destinada ao consumo, o processamento e a utilização do fruto geram subprodutos, principalmente cascas e sementes. Embora sejam frequentemente descartadas, as sementes apresentam composição de interesse nutricional e tecnológico, incluindo proteínas, lipídios, fibras, minerais e diferentes constituintes bioativos. Sua composição pode variar em função da variedade, das condições ambientais e de cultivo, entre outros fatores (Mallek-Ayadi; Bahloul; Kechaou, 2018; Zhang et al., 2024). Entre os componentes bioativos presentes em matrizes vegetais destacam-se os compostos fenólicos, grupo de substâncias que inclui diferentes classes de compostos e que tem sido associado ao potencial antioxidante de produtos e subprodutos vegetais. Estudos realizados com sementes e outros subprodutos de melão demonstram a presença de compostos fenólicos e de outros constituintes bioativos com potencial antioxidante, evidenciando o interesse na caracterização dessas frações do fruto (Mallek-Ayadi; Bahloul; Kechaou, 2018; Vella; Cautela; Laratta, 2019). Os antioxidantes apresentam capacidade de retardar ou inibir processos oxidativos por diferentes mecanismos. Por esse motivo, a atividade antioxidante de matrizes vegetais pode resultar da atuação conjunta de diferentes constituintes e não deve ser atribuída exclusivamente ao teor total de compostos fenólicos. A utilização de Métodos distintos para sua avaliação possibilita, dessa maneira, uma análise mais abrangente do comportamento antioxidante dos extratos estudados (Rolim; Seabra; Macedo, 2018; Vella; Cautela; Laratta, 2019). A investigação dessas propriedades torna-se particularmente relevante diante da necessidade de melhor aproveitamento dos resíduos e subprodutos gerados pela cadeia de alimentos. As sementes de melão correspondem a uma parcela do fruto que ainda apresenta aproveitamento limitado, apesar de seu potencial para obtenção de ingredientes e produtos de maior valor agregado. A valorização desse material pode contribuir para a redução do desperdício, reinserção de nutrientes e compostos bioativos na cadeia produtiva e desenvolvimento de novas aplicações alimentícias, aproximando-se dos princípios da economia circular e da produção sustentável (Zhang et al., 2024). Estudos recentes sobre a valorização de sementes de melão reforçam seu potencial como matéria-prima para aplicações alimentícias e destacam a importância de ampliar sua caracterização nutricional, funcional e biológica. Nesse contexto, a avaliação de extratos obtidos dessas sementes pode fornecer informações relevantes sobre seu potencial bioativo e contribuir para a geração de conhecimentos voltados ao aproveitamento de um material normalmente tratado como subproduto (Zhang et al., 2024). Diante desse contexto, o presente estudo

teve como objetivo avaliar a atividade antioxidante de extratos aquosos de sementes de melão Amarelo e Cantaloupe, por meio da determinação de compostos fenólicos totais e da avaliação da capacidade antioxidante pelos métodos DPPH e ABTS, contribuindo para a caracterização do potencial bioativo dessas sementes e para sua possível valorização como subproduto da cadeia produtiva do melão.

Metodologia

O estudo, de natureza quantitativa e experimental, foi desenvolvido no período de novembro de 2025 a abril de 2026, no Laboratório de Integração de Processos em Engenharia de Alimentos (LIPEA) e Laboratório de Compostos Bioativos em Alimentos (LABTA), integrantes do Complexo de Laboratórios de Engenharia de Alimentos (CLEA), vinculado ao Departamento de Engenharia de Alimentos do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Campus Central, Natal, Rio Grande do Norte. MATERIAIS E MÉTODOS REAGENTES Foram utilizados água destilada, metanol e etanol (adquiridos da Sciavicco) como solventes para o preparo dos extratos e das soluções analíticas. Carbonato de sódio 7,5% (Na2CO3) adquirido da Êxodo científica. O reagente de Folin-Ciocalteu, o ácido 2,2′-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico) (ABTS), o ácido (±) -6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico (Trolox), o 2,2-difenil-1-picril-hidrazil (DPPH) e o ácido gálico foram obtidos da Sigma-Aldrich (São Paulo, Brasil). Também foi utilizado persulfato de potássio no preparo da solução radical ABTS. EQUIPAMENTOS Foram utilizados balança analítica (Shimadzu, modelo AUY220), agitador tipo vortex (modelo VX-38), centrífuga Microhemato (Fanem, modelo 2410), liofilizador (LIOBRAS, modelo L101, Brasil), leitor de microplacas (Biochrom, modelo UVM 340, Cambridge, Inglaterra). PREPARAÇÃO DOS EXTRATOS O presente estudo constitui a continuidade do projeto Elaboração e Caracterização Química de Extratos Vegetais de Sementes de melão. Os extratos aquosos das sementes íntegras previamente secas foram congeladas e posteriormente submetidas ao processo de liofilização em liofilizador de bancada (L101, LIOBRAS, Brasil) a –55 ºC e 13 kPa durante 48 horas. Após a liofilização, as amostras das sementes foram acondicionadas em tubos Falcon de 50mL, devidamente identificadas e armazenadas sob congelamento até a realização das análises de Compostos Fenólicos Totais (CFT) e ensaios DPPH e ABTS. As amostras liofilizadas das sementes de melão Cantaloupe e Amarelo foram reconstituídas com água destilada na proporção de 0,0100g de amostra liofilizada para 1.000 µL (1,0 mL) de água destilada; colocadas em tubos Eppendorf e submetidos a agitação com vortex por 2 minutos, seguidas de centrifugação por 5 minutos à 10.000 rpm. O sobrenadante resultante foi coletado e armazenado em tubos Eppendorf de 2mL para cada tipo de melão. COMPOSTOS FENÓLICOS TOTAIS Os compostos fenólicos totais nas amostras de extrato dos frutos foram avaliados conforme descrito por Singleton et al. (1999). Para análise, 25 µL da amostra das sementes de melão foram misturados com 50 µL de água destilada, 25 µL de reagente de Folin-Ciocalteu (diluído 1:1) e 100 µL de uma solução de carbonato de sódio a 7,5% (p/v) em uma microplaca de 96 poços. A mistura foi incubada por 90 minutos, à temperatura ambiente, sob baixa luminosidade, e a absorbância foi medida a 765 nm usando um leitor de microplacas UVM 340 (Biochrom, Cambridge, Inglaterra). Uma curva padrão foi preparada com concentrações de ácido gálico e os resultados foram expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico por grama de amostra (mg EAG/g de extrato seco). As análises foram realizadas tanto para as amostras de melão Cantaloupe como também para as de melão Amarelo.

ATIVIDADE ANTIOXIDANTE A capacidade antioxidante das amostras foi avaliada usando dois ensaios de eliminação de radicais: 2,2-difenil-1-picril-hidrazil (DPPH) e 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico) (ABTS). O ensaio DPPH foi determinado seguindo Bobo-Garcia et al. (2015). Uma solução de DPPH 150 µM foi preparada em uma mistura de metanol-água 80%. Para a análise, 20 µL da amostra de sementes de melão foram misturados com 180 µL da solução de DPPH e incubados no escuro em temperatura ambiente por 40 minutos. A absorbância foi medida a 515 nm usando um leitor de microplacas UVM 340 (Biochrom, Cambridge, Inglaterra). Uma curva padrão foi preparada usando Trolox, e os resultados foram expressos em micromoles de equivalentes de Trolox por grama de amostra (µmol TE/g de amostra). O ensaio ABTS foi avaliado de acordo com Re et al. (1999). Uma solução aquosa de ABTS 7,0 mM (5,0 mL) foi adicionada a 88,0 µL de uma solução de persulfato de potássio 140 mM, homogeneizada e armazenada no escuro por 16 horas. A solução resultante foi diluída com etanol para atingir uma absorbância de 0,7 a 734 nm (Biochrom, Cambridge, Inglaterra). Uma alíquota de 20 µL da amostra de sementes de melão foi adicionada a 280 µL da solução de ABTS diluída. Após incubação por 6 minutos no escuro, a absorbância foi medida a 734 nm usando um leitor de microplacas (Biochrom, Cambridge, Inglaterra). Uma curva padrão foi preparada usando Trolox, e os resultados foram expressos em micromoles de equivalentes de Trolox por grama de amostra (µmol TE/g de amostra). Todas as análises foram realizadas sob baixa luminosidade, visando minimizar possíveis interferências da luz sobre os componentes das amostras. Os resultados das amostras foram expressos como média e desvio-padrão, calculados utilizando o Microsoft Excel®. Os valores referentes aos padrões empregados na construção das curvas de calibração foram considerados separadamente e não incluídos no cálculo das médias e dos desvios-padrão das amostras.

Resultados e Discussões

Os resultados referentes ao teor de Compostos Fenólicos Totais (CFT) e à atividade antioxidante dos extratos aquosos liofilizados das sementes de melão Amarelo e Cantaloupe, determinada pelos métodos ABTS e DPPH, estão apresentados na Tabela 1. Tabela 1 – Teor de compostos fenólicos totais e atividade antioxidante dos extratos aquosos liofilizados das sementes de melão Amarelo e Cantaloupe. Amostra CFT (mg EAG/g de extrato seco) ABTS (µmol TE/g de extrato seco) DPPH (µmol TE/g de extrato seco) Melão Amarelo 8,8800 ± 0,6279 1,2541 ± 0,4479 2,1489 ± 0,5089 Melão Cantaloupe 4,7646 ± 0,3067 1,2838 ± 0,1266 4,8333 ± 1,0346 Fonte: dados da pesquisa. Nota: resultados expressos como média ± desvio-padrão. EAG = equivalentes de ácido gálico; TE = equivalentes de Trolox. Os extratos das sementes das duas variedades apresentaram compostos fenólicos e atividade antioxidante mensurável pelos ensaios empregados. Entretanto, foram observados comportamentos distintos entre as amostras de acordo com o parâmetro analisado. O melão Amarelo apresentou maior valor médio de CFT, enquanto o Cantaloupe apresentou maior resposta no ensaio de DPPH. Para o ABTS, por sua vez, os valores médios foram próximos. Como não foi realizado teste estatístico para comparação entre as duas variedades, as diferenças observadas são discutidas neste trabalho em termos numéricos, não sendo possível classificá-las como estatisticamente significativas. COMPOSTOS FENÓLICOS TOTAIS O extrato aquoso liofilizado das sementes de melão Amarelo apresentou 8,8800 ± 0,6279 mg EAG/g de extrato seco, enquanto o Cantaloupe apresentou 4,7646 ± 0,3067 mg EAG/g de extrato seco. Assim, o valor médio obtido para o melão

Amarelo foi aproximadamente 1,86 vez o encontrado para o Cantaloupe. A ocorrência de compostos fenólicos em sementes de Cucumis melo é corroborada pelos estudos utilizados como referência neste trabalho. Rolim et al. (2018), ao analisarem resíduos de C. melo var. reticulatus, verificaram teores de fenólicos totais entre 69,77 e 111,65 mg EAG/100g de matéria seca nos diferentes extratos das sementes. Os autores também identificaram nos extratos das sementes compostos como ácido gálico, catequina, ácido vanílico, eugenol, vanilina e quercetina, demonstrando que essa fração do fruto contém diferentes constituintes fenólicos (ROLIM et al., 2018). Vella, Cautela e Laratta (2019), estudando sementes e cascas de Cantaloupe, também confirmaram a presença de diferentes classes de compostos fenólicos nas sementes, incluindo ácidos fenólicos e flavonoides. Os autores destacaram que diferenças no perfil desses constituintes entre trabalhos podem estar associadas à cultivar, às condições ambientais de cultivo e frutificação, ao estado fenotípico da planta e às condições empregadas durante a extração (VELLA; CAUTELA; LARATTA, 2019). Esses fatores são relevantes para interpretar os valores obtidos no presente estudo. Embora ambas as amostras sejam sementes de C. melo, as variedades avaliadas são distintas e os resultados correspondem a extratos aquosos previamente obtidos das sementes, posteriormente congelados, liofilizados e reconstituídos em água. Dessa maneira, comparações quantitativas com outros estudos precisam considerar tanto as características da matéria-prima quanto as diferenças nos processos de obtenção dos extratos. Essa influência pode ser observada no trabalho de Rolim et al. (2018), no qual os extratos aquosos, hidroetanólico e hidrometanólico das sementes apresentaram diferenças quanto à composição dos compostos bioativos. Dessa forma, o maior valor médio de CFT encontrado para o melão Amarelo neste estudo pode estar relacionado às características próprias da amostra e à composição dos compostos extraídos, embora a determinação de CFT, isoladamente, não permita identificar quais substâncias foram responsáveis por essa diferença. Resultados de outros estudos reforçam essa interpretação. Pais (2019), ao avaliar sementes de melão Cantaloupe por extração metanólica, também identificou compostos fenólicos na matriz. De modo semelhante, Bouaziz et al. (2020) encontraram conteúdo expressivo de polifenóis em extrato hidroetanólico de sementes de C. melo var. inodorus. Embora os valores não sejam diretamente comparáveis aos obtidos neste estudo, em razão das diferenças de variedade, solvente e condições de extração, esses achados confirmam a presença de compostos fenólicos em sementes de diferentes tipos de melão. ATIVIDADE ANTIOXIDANTE A atividade antioxidante foi determinada pelos ensaios ABTS e DPPH, os quais permitiram avaliar a resposta dos extratos frente aos respectivos radicais. Os resultados demonstraram que a relação entre teor de CFT e atividade antioxidante não apresentou o mesmo comportamento para as duas variedades em todos os ensaios. Pelo método ABTS, foram obtidos 1,2541 ± 0,4479 µmol TE/g de extrato seco para o melão Amarelo e 1,2838 ± 0,1266 µmol TE/g de extrato seco para o Cantaloupe. As médias foram, portanto, numericamente próximas, apesar de o melão Amarelo ter apresentado maior teor de CFT. Além disso, observa-se maior dispersão dos resultados do melão Amarelo, expressa pelo seu desvio-padrão, quando comparado ao Cantaloupe. Esse comportamento demonstra que, nas condições experimentais adotadas, o maior teor de fenólicos totais do melão Amarelo não correspondeu proporcionalmente a uma maior resposta no ensaio ABTS. Tal resultado deve ser interpretado com cautela, pois a atividade antioxidante de um extrato não depende exclusivamente da quantidade global de compostos fenólicos. A composição do extrato e a natureza dos constituintes presentes também podem influenciar sua resposta nos diferentes métodos. Vella, Cautela e Laratta (2019), por exemplo, identificaram diferentes ácidos fenólicos e flavonoides nas sementes de Cantaloupe e destacaram os

orto-difenóis e flavonoides como grupos de interesse para sua atividade antioxidante. A importância da composição do extrato também é demonstrada por Rolim et al. (2018). Os autores observaram variações na atividade antioxidante entre extratos aquoso, hidroetanólico e hidrometanólico de resíduos de melão e atribuíram diferenças encontradas entre trabalhos, entre outros fatores, à região de cultivo e aos métodos de extração. Esse aspecto é particularmente importante para a presente pesquisa, visto que foram avaliados extratos aquosos liofilizados, enquanto parte dos estudos disponíveis empregou outros solventes de extração. No ensaio DPPH, o comportamento entre as variedades foi mais distinto. O melão Cantaloupe apresentou 4,8333 ± 1,0346 µmol TE/g de extrato seco, enquanto o melão Amarelo apresentou 2,1489 ± 0,5089 µmol TE/g de extrato seco. O valor médio encontrado para o Cantaloupe foi, assim, aproximadamente 2,25 vezes o observado para o melão Amarelo. A capacidade antioxidante de sementes de Cantaloupe frente ao radical DPPH também foi observada por Vella, Cautela e Laratta (2019). No estudo, o extrato das sementes apresentou EC50 de 55,03 mg/mL, e os autores relacionaram a capacidade de sequestro de radicais à presença de compostos fenólicos no material. Esse valor não deve ser comparado numericamente aos resultados do presente trabalho, pois a atividade foi expressa pelos autores em EC50 (mg/mL), enquanto nesta pesquisa os resultados foram calculados a partir de curva-padrão de Trolox e expressos em µmol TE/g de extrato seco. De forma semelhante, estudos com outras variedades de melão confirmam que as sementes apresentam componentes capazes de atuar no sequestro de radicais. Essa observação é importante para demonstrar a atividade antioxidante da matriz, mas diferenças de solvente, forma de preparação do extrato, variedade e expressão dos resultados dificultam comparações quantitativas diretas entre os estudos. A pesquisa de Vella, Cautela e Laratta (2019), demonstra que condições de extração e características da cultivar podem modificar o perfil dos compostos recuperados. Um dos resultados mais relevantes desta pesquisa foi, portanto, a ausência de correspondência proporcional entre CFT e DPPH nas duas variedades. Embora o melão Amarelo tenha apresentado o maior valor médio de CFT, foi o Cantaloupe que apresentou maior atividade média no ensaio de DPPH. Isso indica que, nas condições avaliadas, a quantidade total de compostos detectados pelo ensaio de Folin-Ciocalteu não foi suficiente para explicar isoladamente a resposta antioxidante observada pelo DPPH. Essa interpretação é compatível com a diversidade química descrita para sementes de melão. Rolim et al. (2018) identificaram ácido gálico, catequina, ácido vanílico, eugenol, vanilina e outros compostos nos extratos das sementes, cm concentrações variáveis de acordo com o sistema de extração. Vella, Cautela e Laratta (2019) também demonstraram a ocorrência de diferentes ácidos fenólicos e flavonoides em sementes de Cantaloupe e ressaltaram a influência da cultivar e das condições de extração sobre esse perfil. Assim, diferenças qualitativas e quantitativas na composição dos extratos constituem uma possível explicação para as respostas observadas. Contudo, como neste estudo não foi realizada a identificação individual dos compostos presentes, essa relação deve ser considerada uma hipótese interpretativa, e não uma conclusão sobre o mecanismo responsável. A participação de diferentes classes de compostos bioativos também pode contribuir para essa resposta. Silva (2024) demonstrou potencial antioxidante em extratos ricos em compostos fenólicos obtidos da polpa de melão Cantaloupe, enquanto Medeiros et al. (2019) identificaram o β-caroteno como carotenoide predominante em extratos da polpa dessa variedade. Embora esses estudos tenham utilizado a polpa e não as sementes, seus resultados evidenciam a diversidade de constituintes bioativos presentes no melão e reforçam que a atividade antioxidante não deve ser atribuída a um único grupo de compostos. Essa interpretação também encontra respaldo em Zhang, Li e

Charalampopoulos (2024), que observaram, em sementes de diferentes variedades de melão a presença de frações fenólicas livres, conjugadas e ligadas, cujas capacidades antioxidantes apresentaram comportamentos distintos, evidenciando que a forma de ocorrência desses compostos pode influenciar a resposta antioxidante. A análise conjunta dos resultados evidencia ainda a importância da utilização de mais de um ensaio para caracterizar a atividade antioxidante. Rolim et al. (2018) avaliaram extratos de resíduos de melão por diferentes mecanismos antioxidantes e verificaram respostas distintas conforme o extrato e o ensaio empregado. Dessa maneira, os resultados de CFT, ABTS e DPPH devem ser entendidos como informações complementares sobre as características dos extratos, e não como medidas necessariamente equivalentes entre si. Além do aspecto químico, os resultados reforçam o potencial de aproveitamento das sementes de melão, frequentemente tratadas como subprodutos do processamento. Vella, Cautela e Laratta (2019) destacaram que sementes e cascas de Cantaloupe permanecem como fontes de polifenóis, carotenoides, flavonoides e outros compostos bioativos, apontando possibilidades para sua valorização em diferentes aplicações. Os resultados obtidos nesta pesquisa contribuem para essa perspectiva ao demostrarem que os extratos aquosos liofilizados das sementes de ambas as variedades apresentaram compostos fenólicos e capacidade de atuar nos ensaios antioxidantes utilizados. Portanto, nas condições experimentais avaliadas, o extrato das sementes de melão Amarelo apresentou maior valor médio de Compostos Fenólicos Totais, enquanto o extrato de Cantaloupe apresentou maior resposta média no ensaio DPPH. Para o ABTS, os valores médios obtidos foram próximos entre as variedades. A ausência de correspondência direta entre o maior teor de CFT e a maior atividade nos ensaios antioxidantes evidencia a necessidade de considerar a composição química dos extratos, as características de casa método e as condições de obtenção das amostras na interpretação dos resultados. A identificação e quantificação individual dos compostos bioativos poderá, em estudos posteriores, contribuir para esclarecer quais constituintes estão relacionados às diferenças observadas entre os extratos de sementes de melão Amarelo e Cantaloupe.

Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram que os extratos aquosos liofilizados das sementes de melão Amarelo e Cantaloupe apresentaram compostos fenólicos e atividade antioxidante in vitro, embora com comportamentos distintos entre as variedades e os métodos empregados. A análise conjunta dos resultados evidenciou que o maior teor de compostos fenólicos não esteve necessariamente associado à maior atividade antioxidante em todos os ensaios. Esse comportamento reforça que a capacidade antioxidante dos extratos deve ser interpretada considerando não apenas a concentração global de compostos fenólicos, mas também a composição química da amostra, as características de cada método analítico e as condições de obtenção e preparo dos extratos. Os achados desta pesquisa também reforçam o potencial das sementes de melão como fonte de compostos bioativos, contribuindo para a valorização de um material que pode ser tratado como subproduto do processamento e do consumo do fruto. Dessa forma, o aproveitamento dessas sementes pode representar uma alternativa de interesse tecnológico e científico, especialmente para o desenvolvimento de ingredientes com potencial funcional. Para estudos futuros, recomenda-se ampliar a caracterização química dos extratos por meio da identificação e quantificação individual dos compostos fenólicos e de outros constituintes bioativos, além da aplicação de

métodos complementares de avaliação antioxidante. Também seria relevante investigar diferentes condições de extração, comparar outros solventes e realizar análise estatística entre as variedades, a fim de aprofundar a compreensão sobre os fatores responsáveis pelas diferenças observadas entre as sementes de melão Amarelo e Cantaloupe.

Referências

BARRETO, Norma Danielle Silva. Qualidade, compostos bioativos e capacidade antioxidante de frutos de híbridos comerciais de meloeiro cultivados no CE e RN. 2011. 185 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2011. BOBO-GARCÍA, G.; DAVIDOV-PARDO, G.; ARROQUI, C.; VÍRSEDA, P.; MARÍN-ARROYO, M. R.; NAVARRO, M. Intra-laboratory validation of microplate methods for total phenolic content and antioxidant activity on polyphenolic extracts, and comparison with conventional spectrophotometric methods. Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 95, n. 1, p. 204-209, 2015. DOI: 10.1002/jsfa.6706. BOUAZIZ, Amel; DJIDEL, Saliha; BENTAHER, Assia; KHENNOUF, Seddik. Polyphenolic content, antioxidant and anti-inflammatory activities of melon (Cucumis melo L. var. inodorus) seeds. Journal of Drug Delivery and Therapeutics, v. 10, n. 2-S, p. 22-26, 2020. DOI: 10.22270/jddt.v10i2-s.4022. MALLEK-AYADI, Sana; BAHLOUL, Neila; KECHAOU, Nabil. Chemical composition and bioactive compounds of Cucumis melo L. seeds: potential source for new trends of plant oils. Process Safety and Environmental Protection, v. 113, p. 68-77, 2018. DOI: 10.1016/j.psep.2017.09.016. MEDEIROS, Anny Karoliny de Oliveira Cavalcanti et al. Nanoencapsulation improved water solubility and color stability of carotenoids extracted from Cantaloupe melon (Cucumis melo L.). Food Chemistry, v. 270, p. 562-572, 2019. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.07.099. MELO, Saskia Ferreira de. Potencial antioxidante e anti-inflamatório de compostos bioativos PAIS, Tatiana dos Santos. Avaliação do conteúdo de compostos fenólicos e atividade antioxidante em polpa e semente de melão Cantaloupe (Cucumis melo L.). 2019. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Nutrição) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. RE, R.; PELLEGRINI, N.; PROTEGGENTE, A.; PANNALA, A.; YANG, M.; RICE-EVANS, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radical Biology and Medicine, v. 26, n. 9-10, p. 1231-1237, 1999. DOI: 10.1016/S0891-5849(98)00315-3. ROLIM, P. M.; FIDELIS, G. P.; PADILHA, C. E. A.; SANTOS, E. S.; ROCHA, H. A. O.; MACEDO, G. R. Phenolic profile and antioxidant activity from peels and seeds of melon (Cucumis melo L. var. reticulatus) and their antiproliferative effect in cancer cells. Brazilian Journal of Medical and Biological Research, v. 51, n. 4, e6069, 2018. DOI: 10.1590/1414-431X20176069. ROLIM, P. M.; SEABRA, L. M. J.; MACEDO, G. R. Melon By-Products: Biopotential in Human Health and Food Processing. Food Reviews International, v. 36, n. 1, p. 15-38, 2020. DOI: 10.1080/87559129.2019.1613662. SILVA, Thais Emili Bezerra da. Nanoencapsulação de extrato de compostos fenólicos oriundo da polpa de melão Cantaloupe (Cucumis melo L.): produção e caracterização de partículas, e avaliação do potencial antioxidante in vitro. 2024. 90 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024. SINGLETON, V. L.; ORTHOFER, R.; LAMUELA-RAVENTÓS, R. M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. Methods in Enzymology, v. 299, p. 152-178, 1999. DOI: 10.1016/S0076-6879(99)99017-1. VELLA, Filomena Monica; CAUTELA, Domenico;

LARATTA, Bruna. Characterization of polyphenolic compounds in Cantaloupe melon by-products. Foods, v. 8, n. 6, art. 196, 2019. DOI: 10.3390/foods8060196. ZHANG, Guoqiang; LI, Ziqian; CHARALAMPOPOULOS, Dimitris. Upcycling of melon seed (Cucumis melo L.) oil processing by-product: evaluation of functional properties and nutritional components as novel ingredient. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, v. 11, art. 101, 2024. DOI: 10.1186/s40538-024-00633-6. ZHANG, Guoqiang; LI, Ziqian; LIU, Litai; XIANG, Qisen. Road to valorisation of melon seeds (Cucumis melo L.): a comprehensive review of nutritional profiles, biological activities, and food applications. Sustainable Food Technology, v. 2, p. 1166-1182, 2024. DOI: 10.1039/D4FB00119B.

CÓDIGO: SB1747

AUTOR: DAYANE LARISSA SOUZA DO NASCIMENTO

COAUTOR: MARISA TAINA BOBO FERREIRA

COAUTOR: HEMILY LAIS DOS SANTOS FARIAS

ORIENTADOR: KATYA ANAYA JACINTO SCATTONE

TÍTULO: Desenvolvimento de preparações culinárias com alto teor protéico

Resumo

Objetivo: Este trabalho teve como objetivo elaborar, testar e propor preparações culinárias alternativas com alto teor proteico e baixo custo, além de criar um material educativo em formato de e-book. Método: A metodologia consistiu na triagem de 12 receitas de mídias sociais e sites culinários, reduzidas a 4 preparações que foram executadas na prática e avaliadas quanto à sua composição e viabilidade no Laboratório de Técnica e Dietética da UFRN-FACISA. Resultados: Como resultados, desenvolveram-se o bolinho de grão de bico com frango (18g de proteína; R$ 5,49 a porção), o bolinho de banana (8,6g de proteína; R$ 2,34), o biscoito de semente de abóbora (8g de proteína; R$ 2,49) e a barrinha de granola (6,4g de proteína; R$ 2,59), os quais foram apresentados em um e-book educativo digital de 33 páginas. Conclusão: Conclui-se que a proposta viabilizou receitas proteicas acessíveis utilizando ingredientes locais, resultando em um recurso didático capaz de aproximar o conhecimento científico da realidade do consumidor e incentivar escolhas alimentares mais conscientes.

Palavras-chave: Valor nutricional. Necessidades de proteínas. Rótulos. Receitas.

TITLE: Development of High-Protein Culinary Preparations

Abstract

Objective: This study aimed to develop, test, and propose alternative culinary preparations with high protein content and low cost, as well as to create educational

material in the form of an e-book. Methods: The methodology consisted of screening 12 recipes from social media platforms and culinary websites, which were narrowed down to 4 preparations. These preparations were subsequently prepared and evaluated in terms of their composition and feasibility at the Laboratory of Dietetic Technique at UFRN-FACISA.Results: The following preparations were developed: chickpea and chicken bites (18 g of protein; R$ 5.49 per serving), banana bites (8.6 g of protein; R$ 2.34), pumpkin seed cookies (8 g of protein; R$ 2.49), and a granola bar (6.4 g of protein; R$ 2.59). These preparations were presented in a 33-page digital educational e-book.Conclusion: It is concluded that the proposal enabled the development of affordable, protein-rich recipes using local ingredients, resulting in an educational resource capable of bridging scientific knowledge and consumers' everyday reality, while encouraging more conscious food choices.

Keywords: Nutritional value; Protein requirements; Food label; Recipe.

Introdução

O crescimento do mercado de alimentos com alegações nutricionais tem sido amplamente explorado nos últimos tempos, gerando uma maior percepção da população com saúde, bem-estar e desempenho físico (Brownell; Koplan, 2011). Nesse contexto, produtos com alegação de alto teor proteico têm ganhado destaque, particularmente entre indivíduos que buscam um estilo de vida fisicamente ativo e aqueles que buscam melhorar a composição corporal e a performance esportiva. Entretanto, a presença dessas alegações nos rótulos pode influenciar as escolhas alimentares e transmitir ao consumidor a percepção de que determinado produto apresenta maior qualidade nutricional, podendo acarretar em interpretações errôneas sobre a qualidade real desses produtos alimentícios (Monteiro, 2025; Phillips et al., 2020).

Segundo Horta et al. (2022), o marketing induz ao consumo e a publicidade torna o produto conhecido, agindo juntos na chamada comunicação mercadológica. Indo muito além dos comerciais tradicionais e usando canais diretos e personalizados como: Autopromoção (em sites e redes sociais próprias), Patrocínio (de eventos ou influenciadores digitais) e Publicidade direta (mensagens e e-mails enviados diretamente ao consumidor). Esse fluxo constante de informações e estímulos é o ponto de partida para entender como as marcas moldam as escolhas e as preferências alimentares da população no dia a dia.

No Brasil, a rotulagem nutricional é regulamentada pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), por meio da Resolução RDC nº 429/2020 e da Instrução Normativa nº 75/2020, que estabelecem critérios para a utilização de alegações nutricionais, incluindo aquelas relacionadas ao conteúdo de proteínas (Brasil, 2020a; Brasil, 2020b). Dessa forma, a avaliação das informações presentes nos rótulos é importante para verificar sua adequação aos parâmetros estabelecidos pela legislação e contribuir para escolhas alimentares mais conscientes.

Apesar da relevância dessas informações, parte da população apresenta dificuldades para interpretar rótulos nutricionais, o que pode favorecer escolhas inadequadas e a

percepção equivocada sobre o valor nutricional dos produtos. Além disso, a grande maioria dos alimentos industrializados com maior teor proteico podem apresentar custo elevado, limitando seu acesso por parte de consumidores que buscam aumentar a ingestão de proteínas (Santos et al., 2021).

Nesse cenário, o desenvolvimento de preparações culinárias com alto teor proteico e baixo custo constitui uma alternativa para ampliar o acesso a fontes proteicas, associando qualidade nutricional, viabilidade econômica e praticidade. A utilização de ingredientes disponíveis localmente também pode favorecer a valorização dos alimentos acessíveis à população e contribuir para uma alimentação mais diversificada, bem como, pautado no Guia Alimentar para a População Brasileira (Brasil, 2014).

O município de Santa Cruz, no Rio Grande do Norte, apresenta contexto pertinente para essa discussão, considerando a presença de instituições federais que abarcam jovens em diversos contextos, além disso nota-se a crescente valorização da prática de atividades físicas. Assim, torna-se relevante desenvolver estratégias de educação alimentar e nutricional voltadas à compreensão das informações presentes nos produtos comerciais e à apresentação de alternativas proteicas mais acessíveis.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo elaborar, testar e propor preparações culinárias alternativas com alto teor proteico e baixo custo, a partir da análise de produtos comerciais e da elaboração de um material educativo em formato de e-book.

Metodologia

Este estudo foi conduzido no contexto de um projeto de pesquisa que teve, dentre seus objetivos, realizar a análise de produtos alimentícios disponíveis comercialmente no município de Santa Cruz que apresentaram alegações relacionadas ao alto teor proteico. A avaliação considerou as informações declaradas nos rótulos, possibilitando observar a composição nutricional dos produtos e discutir a utilização das alegações relacionadas ao conteúdo de proteínas a partir dos critérios estabelecidos pela legislação brasileira. Esta etapa da pesquisa, precedeu o desenvolvimento do presente plano de trabalho, no sentido de prover as informações sobre o valor nutricional dos produtos industrializados comercializados no mercado local. A análise contribuiu para fundamentar a elaboração de receitas culinárias que pudessem atender à proposta de oferecer preparações com maior aporte proteico e menor custo.

Para o desenvolvimento das receitas com teor proteico e posterior criação do e-book informativo, foram realizadas pesquisas em mídias sociais (Instagram e YouTube) e sites culinários, a fim de coletar possíveis ideias de receitas. Foram selecionadas 12 receitas com potencial de teste, de forma que algumas destas sofreram ajustes de ingredientes e quantidades, conforme necessidade, para maior adequação nutricional. Em seguida, foi realizada a ficha técnica de planejamento completa de todas as receitas para estimar o teor proteico, a composição centesimal e a viabilidade de execução.

Após avaliação entre orientador e equipe, 4 receitas foram escolhidas para serem testadas na prática. Foram excluídas as receitas que não atingiram alto teor proteico por porção, que apresentaram custo elevado, difícil acesso de ingredientes em pequenos municípios, como Santa Cruz-RN, ou que possuíam baixa praticidade. Uma vez que as receitas estavam definidas e as fichas técnicas construídas, os preparos passaram pela fase de teste. Para isso, os ingredientes foram adquiridos no comércio local de Santa Cruz/RN e, no mesmo dia, transportados para o Laboratório de Técnica e Dietética da UFRN-FACISA,

As receitas passaram pela avaliação sensorial da equipe executora. Após a seleção das receitas, conforme os critérios previamente elencados, seguidas para a etapa de desenvolvimento de testagem das receitas, confeccionada por alunas da equipe executora no Laboratório, neste momento foram reproduzidas as receitas, no qual foi permitindo realizar ajustes necessários, para que assim as receitas chegassem ao objetivo final do trabalho.

Durante a execução, fez-se o controle rigoroso do registro dos ingredientes na ficha técnica de execução, registrando informações como o peso de cada ingrediente utilizado nas respectivas receitas. Com isso, a ficha técnica de execução foi completamente preenchida com os valores referentes ao teor de proteínas, carboidratos e lipídios, valor energético total, além de conter informações relacionadas ao preparo, ingredientes e custo final.

Por fim, desenvolveu-se o e-book informativo através da plataforma Canvas. Para isso, foi feita revisão bibliográfica quanto a interpretação de rotulagem nutricional e consumo de proteínas, de forma que estes temas foram abordados no e-book de maneira simples e prática. Adicionou-se, ainda, as tabelas nutricionais das receitas, fotos reais dos preparos, modo de preparo, utensílios utilizados e rendimento. Buscou-se garantir que o material apresentasse qualidade visual e fosse chamativo, motivo pelo qual foi escolhido o canvas para o desenvolvimento. Assim, o e-book informativo de receitas proteicas foi finalizado e disponibilizado em formato digital (PDF interativo).

Resultados e Discussões

O consumo de alimentos ultraprocessados vem aumentando de forma expressiva e acelerada na vida dos indivíduos, muitas vezes substituindo os alimentos in natura ou minimamente processados (Louzada et al., 2021). Esse cenário reforça a importância de propostas que valorizem preparações culinárias baseadas em alimentos e ingredientes acessíveis, como a desenvolvida neste projeto. Nesse sentido, o desenvolvimento de preparações com alto teor proteico e menor custo pode oferecer alternativas aos produtos industrializados, favorecendo escolhas alimentares mais conscientes e diversificadas.

Com base nos resultados obtidos, foram desenvolvidas quatro preparações culinárias utilizando ingredientes considerados acessíveis e disponíveis no contexto local. A seleção dos ingredientes, sendo eles, o grão de bico, banana, semente de abóbora e granola, buscou priorizar fontes proteicas de fácil aquisição e custo reduzido, visando

possibilitar a reprodução das receitas pela população e ampliar as possibilidades de inclusão de alimentos fontes de proteínas na alimentação cotidiana, bem com, todos os insumos foram adquiridos no comércio local do município de Santa Cruz. A escolha do uso das leguminosas deu-se por serem descritas como excelentes fontes de proteína vegetal, fibras, vitaminas do complexo B e minerais essenciais (ferro, zinco e cálcio). Os alimentos citados atuam como substitutos de carnes e queijos na culinária vegetariana e vegana, permitindo uma enorme variedade de receitas e combinações de sabores (Maraschin, 2024).

A primeira receita, intitulada “bolinho de grão de bico com frango" (Anexo 1) possui um tempo estimado de preparação de 1 hora e 30 minutos, com o rendimento de 10 unidades, rende 5 porções com 2 unidades de bolinhos, no quesito das informações nutricionais, é pertinente destacar que uma porção com 2 unidades (70 gramas) equivalem a 18 gramas de proteína, por um custo por porção de R$ 5,49. Já o “bolinho de banana” (Anexo 2), obteve um tempo estimado de 30 minutos de preparo, com rendimento de 12 unidades e o quantitativo por porção de 4 porções com 3 unidades do bolinho, destacando a informação nutricional uma porção com 3 unidades (54 gramas) possui 8,6 gramas de proteína, por um custo por porção de R$ 2,34.

Segundo Pacheco et al. (2022), o uso de subprodutos vegetais, como sementes de abóbora, contribui para reduzir o desperdício e aproveitar fontes proteicas de baixo custo. A terceira receita, intitulada “biscoito de semente de abóbora” (Anexo 3), teve um tempo de preparo de 30 minutos, rendimento de 18 unidades e um o quantitativo de porções equivalente a 6 porções de 3 unidades, em relação da informação de proteína na preparação uma porção de 3 unidades (50 gramas) obtive 8 gramas de proteína, por um custo por porção de R$ 2,49. A última preparação desenvolvida foi a “barrinha de granola” que totalizou um tempo de preparo de 1 hora e 20 minutos, com rendimento de 462 gramas levando a um quantitativo de 10 porções, neste caso a porção é compreendida por uma unidade de barrinha (56 gramas), contendo de proteína 6,4 gramas e custando por porção R$ 2,59.

As informações anteriores estão disponíveis no produto final do trabalho, sendo esse o e-book educativo em formato digital contendo 33 páginas. O material reúne as informações para além de receitas culinárias, abordando também, a definição, diferenciação e impactos do consumo de proteínas, informações importantes para interpretação e compreensão sobre rotulagem nutricional e as preparações desenvolvidas, bem como, ingredientes, rendimento, modo de preparo, passo a passo e a informação nutricional de cada uma das quatro preparações desenvolvida pela equipe executora. A organização do material contou com uma linguagem simplificada, uma maneira didática de fluxo de informação e bem ilustrada, buscando facilitar o entendimento e a utilização do conteúdo pelo público.

O e-book constitui, portanto, um produto educativo resultante do estudo, articulando conhecimentos sobre composição nutricional, leitura de rótulos e possibilidades de preparações culinárias proteicas de menor custo e utilizando alimentos in natura e minimamente processados. A proposta busca contribuir para a educação alimentar e nutricional, oferecendo informações que auxiliem o consumidor na avaliação crítica de produtos comercializados e na identificação de alternativas culinárias que possam ser incorporadas à alimentação cotidiana. Nesse contexto, materiais educativos constituem importantes ferramentas para a promoção da alimentação adequada e saudável, ao

possibilitarem a disseminação de informações nutricionais e orientações práticas à população (Azevedo; Damião; Castro, 2025). Assim, o e-book desenvolvido neste projeto busca aproximar o conhecimento nutricional da realidade dos consumidores, apresentando informações sobre proteínas, rotulagem e preparações culinárias acessíveis.

É importante destacar que a análise sensorial das preparações não compõe os resultados apresentados neste trabalho. Embora estivesse prevista inicialmente no planejamento, essa etapa será desenvolvida posteriormente em um projeto específico que se encontra em andamento.

Conclusão

As preparações desenvolvidas, testadas e propostas apresentam-se como diferentes alternativas para inclusão de fontes proteicas na alimentação cotidiana. A utilização dos ingredientes selecionados demonstra que é possível elaborar alternativas com menor custo em comparação a determinados produtos proteicos industrializados, ampliando as possibilidades de acesso a preparações diversificadas.

O material educativo produzido a partir desta pesquisa apresenta importantes informações sobre proteínas, rotulagem nutricional e sobre as preparações desenvolvidas, as quais são apresentadas de forma didática e acessível. Dessa forma, o material constitui uma estratégia de educação alimentar e nutricional, ao aproximar informações técnicas da realidade dos consumidores e estimular uma compreensão mais crítica sobre os produtos alimentícios e suas alegações nutricionais. Conclui-se, portanto, que a proposta contribuiu para a integração entre conhecimento nutricional, desenvolvimento de preparações culinárias, saúde, bem estar e educação alimentar, apresentando alternativas proteicas acessíveis e práticas que podem favorecer escolhas alimentares mais conscientes e diversificadas.

Como desdobramento deste projeto, espera-se o desenvolvimento e promoção de estratégias de divulgação do material produzido e também a realização de análises sensoriais das preparações para compreender a percepção das pessoas e a aceitabilidade das receitas desenvolvidas.

Referências

AZEVEDO, Simone de Pinho Ferreira; DAMIÃO, Jorginete de Jesus; CASTRO, Inês Rugani Ribeiro de. Brazilian dietary guidelines: interfaces with the mother and child hospital context. **Epidemiologia e Serviços de Saúde,** v. 34, e20240391, 2025. Acesso em: 01 de setembro de 2026.

BRASIL. Instrução Normativa (IN) nº 75, de 8 de outubro de 2020. Estabelece os requisitos técnicos para declaração da rotulagem nutricional nos alimentos embalados. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 out. 2020a. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-in-n-75-de-8-de-outubro-de-2020-282071143. Acesso em: 01 de setembro. 2026.

BRASIL. Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 429, de 8 de outubro de 2020. Dispõe sobre a rotulagem nutricional dos alimentos embalados. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 out. 2020b. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-de-diretoria-colegiada-rdc-n-429-de-8-de-outubro-de-2020-282070599. Acesso em: 01 setembro de 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica. **Guia alimentar para a população brasileira.** 2. ed., 1. reimpr. Brasília: Ministério da Saúde, 2014. 156 p. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/guia_alimentar_populacao_brasileira_2ed.pdf. Acesso em: 30 de agosto. 2026.

BROWNELL, K. D.; KOPLAN, J. P. Front-of-package nutrition labeling — an abuse of trust by the food industry? **The New England Journal of Medicine**, Boston, v. 364, n. 25, p. 2373-2375, 23 jun. 2011. DOI: https://doi.org/10.1056/NEJMp1101033. Acesso em: 01 de setembro. 2026.

HORTA, Paula Martins *et al.* Ambiente de informação: marketing e publicidade de alimentos. In: MENDES, Larissa Loures; PESSOA, Milene Cristine; COSTA, Bruna Vieira de Lima (org.). Ambiente alimentar: saúde e nutrição. Rio de Janeiro: **Rubio**, 2022. cap. 11. Acesso em: 01 de setembro. 2026.

LOUZADA, Maria Laura da Costa *et al*. Impacto do consumo de alimentos ultraprocessados na saúde de crianças, adolescentes e adultos: revisão de escopo. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 37, supl. 1, e00323020, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0102-311X00323020. Acesso em: 01 de setembro. 2026.

MARASCHIN, Camilla Brum. **E-book de receitas com alimentos da Cesta Básica de custo acessível e relevância cultural para as famílias do Rio Grande do Sul.** 2024. 297 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Nutrição) – Curso de Nutrição, Faculdade de Medicina, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024. Acesso em: 01 de setembro de 2026.

MONTEIRO, Carolina Florim da Silva. **A Influência das Alegações Nutricionais na Percepção do Consumidor.** Rio de Janeiro, 2025. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Administração. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Acesso em: 01 de setembro. 2026.

PACHECO, A. F. C. *et al.* Proteínas de sementes de abóbora e propriedades multifuncionais de seus hidrolisados: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, e47211831161, 2022. DOI: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i8.31161. Acesso em: 01 de setembro de 2026.

SANTOS, Larissa Lira dos, *et al.* Leitura dos rótulos nutricionais e o consumo excessivo de alimentos ultraprocessados: relato de experiência de oficina prática na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Brazilian Journal of Health Review**, Curitiba, v. 4, n. 4, p. 18400-18419, jul./ago. 2021. DOI: https://doi.org/10.34119/bjhrv4n4-310. Acesso em: 01 de setembro de 2026.

Anexos



ANEXO 1 - "Bolinho de grão de grão de bico com frango"



ANEXO 2 - "Bolinho de banana"



ANEXO 3 - "Biscoito de semente de abóbora"



ANEXO 4 - "Barrinha de granola"

CÓDIGO: SB1755

AUTOR: RAYLAM WENDEL DA SILVA

ORIENTADOR: MARCELO AUGUSTO COSTA FERNANDES

TÍTULO: Seleção Evolutiva Multiobjetivo de Genes para Classificação de Subgrupos de Meduloblastoma

Resumo

O meduloblastoma é um tumor cerebral pediátrico molecularmente heterogêneo, classificado nos subgrupos WNT, SHH, Grupo 3 e Grupo 4. O plano de trabalho inicialmente previa a aplicação de XGBoost associada a técnicas de interpretação pós-hoc, como SHAP, para classificação e interpretação desses subgrupos. Ao longo do desenvolvimento, a abordagem foi direcionada para uma estratégia explicável por projeto, integrando XGBoost ao algoritmo evolutivo multiobjetivo NSGA-II para otimizar simultaneamente o desempenho de classificação e a redução do número de genes. Foram analisados dados de expressão gênica da coorte pública GSE85217, com 612 amostras após o pré-processamento. Após filtragem inicial por ANOVA, foram avaliados espaços candidatos de 1.000 e 2.000 genes. As soluções selecionadas pelo ponto de joelho da frente de Pareto continham 7 e 14 genes, respectivamente, e ambas alcançaram 95,93% de acurácia no conjunto de teste. Os resultados demonstram que assinaturas gênicas compactas podem preservar alto desempenho discriminativo, aumentando a interpretabilidade do modelo e contribuindo para a investigação de potenciais biomarcadores em meduloblastoma.

Palavras-chave: Meduloblastoma; XGBoost; NSGA-II; Seleção de Genes; Expressão Gênica;

TITLE: Multi-objective Evolutionary Gene Selection for Medulloblastoma Subgroup Classification

Abstract

Medulloblastoma is a molecularly heterogeneous pediatric brain tumor classified into the WNT, SHH, Group 3, and Group 4 subgroups. The original research plan proposed the use of XGBoost combined with post-hoc interpretation techniques, such as SHAP, for subgroup classification and interpretation. During the development of the project, the methodology evolved toward an explainable-by-design strategy integrating XGBoost with the NSGA-II multi-objective evolutionary algorithm to simultaneously optimize classification performance and reduce the number of selected genes. Gene expression data from the public GSE85217 cohort were analyzed, comprising 612

samples after preprocessing. Following initial ANOVA-based filtering, candidate spaces containing 1,000 and 2,000 genes were evaluated. The knee-selected Pareto solutions contained 7 and 14 genes, respectively, and both achieved 95.93% accuracy on the test set. These results demonstrate that compact gene signatures can preserve strong discriminative performance while increasing model interpretability and supporting the investigation of potential biomarkers in medulloblastoma.

Keywords: Medulloblastoma; XGBoost; NSGA-II; Gene Selection; Gene Expression;

Introdução

O meduloblastoma é o tumor cerebral maligno pediátrico mais comum e apresenta elevada heterogeneidade molecular. Atualmente, a doença é classificada em quatro principais subgrupos (WNT, SHH, Grupo 3 e Grupo 4), que apresentam diferenças em seus perfis moleculares, características clínicas, prognóstico e resposta terapêutica. Dessa forma, a correta identificação desses subgrupos é relevante para a caracterização da doença, a estratificação de risco e o desenvolvimento de estratégias terapêuticas mais individualizadas [1]–[3]. Com o avanço das tecnologias de análise transcriptômica, dados de expressão gênica passaram a ser amplamente utilizados para investigar as diferenças moleculares entre os subgrupos de meduloblastoma. Esses dados, entretanto, apresentam alta dimensionalidade, uma vez que milhares de genes podem ser avaliados simultaneamente em um número relativamente limitado de amostras. Esse cenário representa um desafio tanto para a construção de modelos preditivos quanto para a interpretação dos fatores moleculares associados às classificações obtidas [4]–[6]. Métodos de aprendizado de máquina, como o XGBoost, têm demonstrado potencial para a classificação de amostras a partir de perfis de expressão gênica [4]. Apesar do elevado desempenho que esses modelos podem alcançar, sua utilização com grandes conjuntos de variáveis pode dificultar a interpretação dos resultados e a identificação de assinaturas moleculares mais concisas. Em aplicações biomédicas, essa limitação é especialmente relevante, uma vez que modelos com menor número de características podem facilitar a compreensão dos padrões biológicos envolvidos e contribuir para a investigação de potenciais marcadores moleculares [7], [8]. Nesse contexto, estratégias de seleção de características tornam-se importantes para reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar subconjuntos de genes capazes de preservar a informação necessária para a classificação. Além do desempenho preditivo, a busca por modelos mais parcimoniosos pode favorecer abordagens de inteligência artificial mais interpretáveis, nas quais a compreensão das características utilizadas pelo modelo constitui parte central da análise [7], [8]. Diante disso, este trabalho teve como objetivo investigar uma abordagem de seleção de genes voltada à classificação dos quatro subgrupos moleculares de meduloblastoma a partir de dados de expressão gênica, buscando conciliar elevado desempenho preditivo e redução do número de genes utilizados. A proposta visa contribuir para o desenvolvimento de modelos mais compactos e interpretáveis e para a identificação de assinaturas moleculares potencialmente relevantes na caracterização dos subgrupos da doença.

Metodologia

Foram utilizados dados públicos de expressão gênica de meduloblastoma da coorte GSE85217, disponibilizada no Gene Expression Omnibus. O conjunto original continha 763 amostras e 20.227 características de expressão gênica. Após o pré-processamento, que incluiu a remoção de amostras com rótulos ausentes, baixa qualidade ou duplicações, foram mantidas 612 amostras pertencentes aos quatro principais subgrupos moleculares de meduloblastoma: WNT, SHH, Grupo 3 e Grupo 4 [9]. Os dados foram divididos em conjuntos de treinamento e teste nas proporções de 80% e 20%, respectivamente, por meio de amostragem estratificada, de modo a preservar a distribuição das classes. O conjunto de teste foi mantido isolado durante as etapas de otimização e seleção do modelo, sendo utilizado apenas na avaliação final. Valores ausentes nas matrizes de expressão gênica foram tratados por imputação pela mediana. Os parâmetros de imputação foram estimados exclusivamente a partir dos dados de treinamento e posteriormente aplicados ao conjunto de teste, evitando vazamento de informação entre as etapas. Devido à alta dimensionalidade dos dados transcriptômicos, foi realizada inicialmente uma etapa de filtragem univariada por meio do teste ANOVA F. Os genes foram ranqueados de acordo com seus respectivos escores, e foram definidos dois espaços candidatos contendo os 1.000 e os 2.000 genes mais discriminativos. Essa etapa teve como finalidade reduzir a complexidade computacional da busca sem determinar diretamente a assinatura final de genes utilizada pelo classificador. A seleção das características foi formulada como um problema de otimização multiobjetivo. Cada solução candidata foi representada por um cromossomo binário, em que cada posição correspondia a um gene do espaço de busca e indicava sua inclusão ou exclusão no subconjunto avaliado. A otimização buscou simultaneamente maximizar o desempenho de classificação e minimizar o número de genes selecionados. Para isso, foi utilizado o algoritmo Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), integrado ao classificador Extreme Gradient Boosting (XGBoost). O XGBoost foi empregado como classificador de base em um problema multiclasse, utilizando o objetivo multi:softmax. Os principais hiperparâmetros foram mantidos fixos durante todo o processo evolutivo, com profundidade máxima das árvores igual a 3, taxa de aprendizado de 0,08 e 400 estimadores. Essa padronização permitiu que as diferentes combinações de genes fossem comparadas sob as mesmas condições de classificação. A avaliação de aptidão das soluções durante o processo evolutivo foi realizada por validação cruzada estratificada em cinco folds, aplicada exclusivamente ao conjunto de treinamento. Para reduzir o efeito do desbalanceamento entre os subgrupos, foi utilizado Random Over-Sampling nas partições de treinamento de cada fold, sem alteração das respectivas partições de validação. O desempenho médio obtido ao longo dos folds foi utilizado como um dos objetivos da otimização, enquanto o segundo objetivo correspondeu ao número de genes selecionados em cada solução. O processo evolutivo foi executado com população de 80 indivíduos ao longo de 40 gerações. Foram empregados operadores de crossover uniforme e mutação do tipo bit-flip, com probabilidade de mutação inversamente proporcional ao comprimento do cromossomo. A seleção das soluções foi baseada em dominância de Pareto e distância de crowding, permitindo preservar diversidade populacional e identificar diferentes compromissos entre desempenho preditivo e complexidade do modelo. Ao final da otimização, as soluções não dominadas formaram uma frente de Pareto. Como o algoritmo retorna múltiplas soluções possíveis, foi utilizado o critério do ponto de joelho para selecionar uma assinatura final em cada espaço candidato. Esse ponto foi definido como a solução mais próxima do vetor ideal após a normalização dos objetivos, representando um compromisso entre elevado desempenho de classificação e baixo número de genes. Por fim, para cada configuração, o subconjunto de genes selecionado pelo ponto de joelho

foi utilizado para treinar um modelo XGBoost com todo o conjunto de treinamento. O desempenho final foi então avaliado no conjunto de teste previamente isolado. Foram consideradas métricas de acurácia, acurácia balanceada, F1-score macro e matrizes de confusão, permitindo avaliar tanto o desempenho global quanto o comportamento do classificador em cada subgrupo molecular.

Resultados e Discussões

A aplicação do framework baseado em NSGA-II e XGBoost permitiu identificar diferentes soluções de compromisso entre desempenho de classificação e número de genes selecionados. As frentes de Pareto obtidas para os dois espaços candidatos, contendo 1.000 e 2.000 genes, são apresentadas nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Em ambas as configurações, soluções compostas por um número maior de genes tenderam a apresentar desempenho de validação cruzada ligeiramente superior, enquanto soluções mais compactas preservaram desempenho elevado com menor complexidade. Esse comportamento evidencia o caráter multiobjetivo do problema e demonstra que a redução do número de características não implica necessariamente perda expressiva de capacidade discriminativa, indicando a presença de redundância relevante no espaço transcriptômico analisado.

Para o espaço candidato de 1.000 genes, o ponto de joelho da frente de Pareto (Figura 1) correspondeu a uma assinatura contendo apenas 7 genes, com escore médio de validação cruzada de aproximadamente 0,9907. Esse resultado é particularmente relevante considerando que o conjunto original continha 20.227 características de expressão gênica. Assim, após a filtragem preliminar e a otimização evolutiva, foi possível obter uma solução extremamente compacta sem perda substancial de desempenho. A existência de uma solução com apenas sete genes e desempenho próximo ao máximo observado na frente sugere que parte considerável da informação necessária para diferenciar os subgrupos pode estar concentrada em um subconjunto bastante reduzido de características.

Quando o espaço candidato foi ampliado para 2.000 genes, o ponto de joelho da respectiva frente de Pareto (Figura 2) foi deslocado para uma solução contendo 14 genes, com escore de validação cruzada de aproximadamente 0,9857. Embora essa assinatura seja maior que a encontrada na configuração anterior, o desempenho permaneceu comparável. A expansão do espaço de busca aumenta substancialmente o número de combinações possíveis e permite que o algoritmo explore subconjuntos alternativos de genes capazes de fornecer informação discriminativa semelhante. Dessa forma, a diferença entre as assinaturas selecionadas nas duas configurações não deve ser interpretada como uma inconsistência do método, mas como uma consequência da redundância e da correlação presentes em dados transcriptômicos, nos quais diferentes conjuntos de genes podem conter informações parcialmente equivalentes para uma mesma tarefa de classificação.

Também é importante observar que o escore da solução de 2.000 genes foi discretamente inferior ao obtido para 1.000 genes. Esse comportamento não implica que o aumento do espaço candidato tenha necessariamente prejudicado o modelo. A solução final não foi escolhida exclusivamente pela maximização do desempenho de validação

cruzada, mas pelo compromisso entre desempenho e parcimônia representado pelo ponto de joelho. Como evidenciado pelas Figuras 1 e 2, diferentes configurações da frente de Pareto podem levar à seleção de soluções com características distintas mesmo quando existem soluções com desempenho ligeiramente superior. Esse aspecto reforça a proposta do trabalho de não tratar a seleção gênica como um problema puramente preditivo, mas como uma otimização conjunta entre capacidade de classificação e simplicidade do modelo.

A dinâmica do processo evolutivo ao longo das gerações é apresentada nas Figuras 3 e 4, correspondentes aos espaços candidatos de 1.000 e 2.000 genes, respectivamente. Para o espaço de 1.000 genes (Figura 3), o NSGA-II apresentou rápida melhoria de aptidão nas fases iniciais da busca, com os indivíduos de melhor desempenho aproximando-se de valores próximos ao máximo principalmente nas primeiras 10 a 15 gerações. Paralelamente, a aptidão média da população aumentou progressivamente. A manutenção de uma diferença entre indivíduos de melhor e pior desempenho ao longo das gerações indica que a população não convergiu de forma prematura para uma única solução, preservando diversidade suficiente para explorar diferentes compromissos entre os objetivos.

Para a configuração com 2.000 genes (Figura 4), observou-se tendência semelhante, porém com evolução média mais suave e discretamente mais lenta. Esse comportamento é compatível com o aumento da dimensionalidade do espaço de busca, uma vez que a duplicação do número de genes candidatos amplia consideravelmente o conjunto de combinações que podem ser exploradas. Ainda assim, os indivíduos de melhor desempenho e os quantis superiores apresentaram progressiva estabilização, indicando que o processo evolutivo foi capaz de encontrar soluções de alta qualidade mesmo no cenário de maior complexidade. A manutenção da diversidade populacional observada em ambas as configurações é particularmente importante em otimização multiobjetivo, pois permite que o algoritmo preserve simultaneamente soluções mais compactas e soluções com maior desempenho, em vez de convergir para uma única configuração.

Após a seleção das soluções pelo ponto de joelho, os subconjuntos de genes foram utilizados no treinamento dos classificadores finais, avaliados no conjunto de teste mantido isolado durante todo o processo de otimização. Para a configuração com 1.000 genes candidatos e assinatura final de 7 genes, foi obtida acurácia de 95,93% e F1-score macro de 0,9524. Já para a configuração com 2.000 genes candidatos e assinatura de 14 genes, a acurácia permaneceu em 95,93%, enquanto o F1-score macro aumentou discretamente para 0,9605. As matrizes de confusão normalizadas correspondentes às duas configurações são apresentadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

O fato de ambas as configurações apresentarem a mesma acurácia global, apesar das diferenças observadas durante a validação cruzada, não representa uma inconsistência. O escore empregado durante a otimização foi estimado por validação cruzada exclusivamente no conjunto de treinamento e teve como função orientar a busca evolutiva. A acurácia final, por outro lado, foi calculada posteriormente em um conjunto independente de 123 amostras. Nas duas configurações, 118 dessas 123 amostras foram classificadas corretamente, resultando na mesma acurácia de 95,93%. No entanto, os erros ocorreram de forma diferente entre os subgrupos, o que explica a diferença observada no F1-score macro e nos padrões apresentados pelas matrizes de confusão das Figuras 5 e 6.

Na configuração com 7 genes (Figura 5), o Grupo 3 apresentou precisão de 0,9500, recall de 0,8261 e F1-score de 0,8837. O Grupo 4 apresentou precisão de 0,9455, recall de 0,9811 e F1-score de 0,9630. Para SHH, precisão, recall e F1-score atingiram 1,0000, enquanto o grupo WNT apresentou recall de 1,0000 e F1-score de 0,9630. A matriz de confusão mostrou que a maior dificuldade do classificador esteve associada ao Grupo 3: aproximadamente 13% dessas amostras foram classificadas como Grupo 4 e 4,3% como WNT. Em contraste, o Grupo 4 apresentou apenas pequena confusão com o Grupo 3, e todas as amostras SHH e WNT foram corretamente identificadas em termos de sensibilidade.

Na configuração com 14 genes (Figura 6), o desempenho do Grupo 3 apresentou discreta melhora, com recall de aproximadamente 87,0% e F1-score de 0,8889. O Grupo 4 manteve desempenho elevado, com recall de aproximadamente 96,2% e F1-score de 0,9533. Novamente, SHH e WNT atingiram recall de 100%. Nesse cenário, os erros do Grupo 3 concentraram-se principalmente em sua classificação como Grupo 4, enquanto uma pequena parcela das amostras de Grupo 4 foi classificada como Grupo 3. Assim, a principal região de sobreposição permaneceu entre os Grupos 3 e 4, independentemente do tamanho do espaço candidato utilizado.

A manutenção desse padrão de erro nas duas configurações é biologicamente plausível, uma vez que os Grupos 3 e 4 apresentam maior proximidade molecular e transcriptômica entre si do que os demais subgrupos [2], [9]. Dessa forma, a concentração das classificações incorretas entre essas duas categorias, observada nas Figuras 5 e 6, sugere que os erros não ocorreram de maneira completamente aleatória. Ao mesmo tempo, a identificação consistente de SHH e WNT indica que as assinaturas selecionadas preservaram características fortemente discriminativas desses subgrupos.

A comparação entre os dois modelos também evidencia a importância de considerar métricas além da acurácia. Embora ambos tenham apresentado exatamente 95,93% de acurácia, a configuração com 2.000 genes apresentou F1-score macro ligeiramente superior. Como essa métrica atribui peso equivalente ao desempenho de cada classe antes de realizar a média, ela é sensível à maneira como os erros são distribuídos entre os diferentes subgrupos. Portanto, o aumento discreto do F1-score macro na configuração de 14 genes indica um comportamento um pouco mais equilibrado entre as classes, especialmente pela melhora do recall do Grupo 3. Em contrapartida, esse ganho ocorreu ao custo de uma assinatura duas vezes maior, reforçando novamente o compromisso entre parcimônia e desempenho evidenciado pelas frentes de Pareto.

Além da avaliação preditiva, as assinaturas resultantes foram analisadas quanto às categorias funcionais dos genes selecionados. Na configuração com 1.000 genes candidatos, a assinatura de 7 genes foi composta por PCK2, CACNA1F, SLC16A7, SLC16A4, NEUROD2, PDLIM4 e FIGNL2. Esses genes representam diferentes aspectos da biologia celular, incluindo metabolismo mitocondrial, transporte, canais iônicos, sinalização, diferenciação neuronal e organização do citoesqueleto. PCK2 foi associado à função metabólica mitocondrial, enquanto SLC16A7 e SLC16A4 estão relacionados ao transporte e ao metabolismo. CACNA1F representa processos ligados a canais iônicos e sinalização, e NEUROD2 corresponde a um fator de transcrição relacionado a programas de diferenciação neuronal. PDLIM4 e FIGNL2, por sua vez, foram relacionados a funções estruturais e ao citoesqueleto.

Na configuração com 2.000 genes, a assinatura selecionada incorporou outros genes associados principalmente à regulação transcricional e à sinalização celular. Entre eles, ZIC2, SOX9, NRL e CREB3L2 foram classificados como fatores de transcrição, enquanto ARRB1 foi associado à transdução de sinais, ARHGAP32 a mecanismos de sinalização e organização do citoesqueleto, e NPR3 à atividade de receptor e sinalização. A presença de múltiplos fatores de transcrição é compatível com a natureza do meduloblastoma como uma doença fortemente relacionada a programas de desenvolvimento e diferenciação celular, nos quais alterações na regulação transcricional podem contribuir para a separação molecular entre os diferentes subgrupos [2], [9].

Um resultado particularmente relevante foi a recorrência dos genes PDLIM4 e FIGNL2 nas duas configurações avaliadas. Como os espaços candidatos e as soluções finais eram diferentes, a seleção desses genes em ambos os cenários fornece uma indicação inicial de consistência em relação à variação do espaço de busca. No entanto, essa recorrência deve ser interpretada com cautela: ela não demonstra, por si só, que esses genes constituem biomarcadores clínicos validados ou que sejam necessariamente os elementos biologicamente mais importantes das assinaturas. O resultado indica apenas que, dentro das condições avaliadas, esses genes foram repetidamente considerados úteis pelo processo evolutivo para a discriminação dos subgrupos.

Entre os genes recorrentes, PDLIM4 se destaca por sua associação com a organização do citoesqueleto e com complexos relacionados à actina. Alterações em componentes estruturais e de sinalização podem refletir diferenças no estado celular entre os subgrupos, contribuindo para os padrões transcriptômicos utilizados pelo classificador. De maneira geral, a combinação de genes relacionados a metabolismo, neurodesenvolvimento, sinalização e citoesqueleto sugere que a separação dos subgrupos não depende de uma única categoria funcional, mas de diferentes eixos moleculares representados conjuntamente nas assinaturas selecionadas.

Outro aspecto relevante é que a maioria dos genes selecionados na configuração com 1.000 candidatos não foi mantida na solução obtida com 2.000 genes. Esse resultado é compatível com a natureza altamente correlacionada dos dados de expressão gênica. Genes diferentes podem representar processos biológicos semelhantes ou carregar informações parcialmente redundantes para a classificação. Quando novos candidatos são introduzidos, o algoritmo pode encontrar combinações alternativas que fornecem desempenho semelhante, sem necessariamente preservar todos os elementos de uma assinatura anterior. Dessa forma, os resultados não indicam a existência de uma única assinatura gênica obrigatória para a classificação dos subgrupos, mas sim de múltiplos subconjuntos compactos capazes de preservar elevado poder discriminativo.

Em conjunto, os resultados demonstram que a combinação entre NSGA-II e XGBoost foi capaz de expor de maneira explícita o compromisso entre desempenho preditivo e complexidade do modelo. Conforme demonstrado pelas frentes de Pareto das Figuras 1 e 2, a seleção pelo ponto de joelho permitiu reduzir substancialmente a dimensionalidade dos dados sem recorrer a um número de genes definido arbitrariamente, produzindo assinaturas de 7 e 14 genes com desempenho semelhante no conjunto de teste. Esse comportamento sustenta a proposta de uma abordagem explicável por projeto, na qual a interpretabilidade não é adicionada apenas após o

treinamento do classificador, mas incorporada diretamente à seleção das características utilizadas pelo modelo [7], [8].

Embora os resultados sejam promissores, as assinaturas identificadas devem ser consideradas candidatas e não biomarcadores clínicos já estabelecidos. A avaliação foi realizada a partir de uma única coorte, ainda que com um conjunto de teste independente da etapa de otimização. Dessa forma, a generalização das assinaturas para outras populações ou plataformas de expressão não foi avaliada no presente trabalho. Além disso, por se tratar de um algoritmo evolutivo estocástico, análises futuras com múltiplas execuções independentes podem fornecer uma caracterização mais detalhada da estabilidade de seleção de cada gene. A comparação com métodos alternativos de seleção de características também poderia auxiliar na avaliação da vantagem do framework multiobjetivo em relação a estratégias mais simples. Esses aspectos representam extensões naturais do trabalho e são importantes para avaliar a robustez e o potencial translacional das assinaturas identificadas.

De maneira geral, os resultados indicam que classificadores de alto desempenho para os subgrupos moleculares do meduloblastoma podem ser construídos utilizando um número muito reduzido de genes. A preservação de acurácia de 95,93% com assinaturas contendo apenas 7 ou 14 genes, juntamente com a identificação de padrões funcionais coerentes e a recorrência de genes entre diferentes espaços candidatos, reforça o potencial da seleção evolutiva multiobjetivo como estratégia para conciliar desempenho e interpretabilidade em dados transcriptômicos de alta dimensionalidade.

Conclusão

Este trabalho investigou uma abordagem de seleção evolutiva de genes para a classificação dos quatro principais subgrupos moleculares de meduloblastoma a partir de dados de expressão gênica. A integração entre NSGA-II e XGBoost permitiu tratar a seleção de características como um problema multiobjetivo, conciliando desempenho preditivo e redução do número de genes utilizados pelo modelo. Os resultados demonstraram que assinaturas extremamente compactas foram capazes de preservar elevado desempenho de classificação. As soluções selecionadas a partir de espaços candidatos de 1.000 e 2.000 genes resultaram em conjuntos de 7 e 14 genes, respectivamente, ambos com acurácia de 95,93% no conjunto de teste. Além disso, os padrões de classificação foram consistentes entre as configurações, com melhor discriminação dos subgrupos SHH e WNT e maior sobreposição entre os Grupos 3 e 4. As assinaturas identificadas incluíram genes associados a processos de neurodesenvolvimento, metabolismo, sinalização celular e organização do citoesqueleto, com recorrência de PDLIM4 e FIGNL2 nas duas configurações avaliadas. Esses achados reforçam o potencial da abordagem para produzir modelos mais compactos e interpretáveis, sem comprometer de forma relevante o desempenho preditivo. Apesar dos resultados promissores, as assinaturas obtidas ainda devem ser consideradas candidatas, sendo necessária sua validação em coortes independentes e a avaliação de sua estabilidade em múltiplas execuções do algoritmo. Assim, o framework proposto apresenta potencial para contribuir tanto para a classificação molecular explicável do meduloblastoma quanto para a investigação de assinaturas gênicas relevantes em estudos futuros.

Referências

[1] St. Jude Children's Research Hospital. "Medulloblastoma in children and teens." 2025. [2] M. D. Taylor, P. A. Northcott, A. Korshunov, M. Remke, Y.-J. Cho, S. C. Clifford, C. G. Eberhart, D. W. Parsons, S. Rutkowski, A. Gajjar, R. J. Wechsler-Reya, S. L. Pomeroy, R. J. Gilbertson, and S. M. Pfister. "Molecular subgroups of medulloblastoma: the current consensus." Acta Neuropathologica, vol. 123, no. 4, pp. 465–472, 2012. [3] V. Vemireddy, J. A. Kalapurakal, A. D'Souza, S. Mohankumar, J. L. Finlay, and B. Rood. "Medulloblastoma: Challenges and advances in treatment and surveillance." Cancer, vol. 127, no. 8, pp. 1228–1240, 2021. [4] H. Hourfar, P. Taklifi, M. Razavi, and B. Khorsand. "Machine learning-driven identification of molecular subgroups in medulloblastoma via gene expression profiling." Clinical Oncology, vol. 40, p. 103789, 2025. [5] E. Sharif Rahmani, A. Lawarde, P. Lingasamy, S. V. Moreno, A. Salumets, and V. Modhukur. "MBMethPred: a computational framework for the accurate classification of childhood medulloblastoma subgroups using data integration and AI-based approaches." Frontiers in Genetics, vol. 14, p. 1233657, 2023. [6] B. Lan. "Leveraging random forest machine learning for subgroup classification of medulloblastoma." Journal of Research in Social Science and Humanities, vol. 3, no. 12, pp. 41–52, 2024. [7] S. Benfatto, M. Sill, D. T. Jones, S. M. Pfister, F. Sahm, A. von Deimling, D. Capper, and V. Hovestadt. "Explainable artificial intelligence of DNA methylation-based brain tumor diagnostics." Nature Communications, vol. 16, no. 1, p. 1787, 2025. [8] S. Khalighi, K. Reddy, A. Midya, K. B. Pandav, A. Madabhushi, and M. Abedalthagafi. "Artificial intelligence in neuro-oncology: advances and challenges in brain tumor diagnosis, prognosis, and precision treatment." NPJ Precision Oncology, vol. 8, no. 1, p. 80, 2024. [9] P. A. Northcott et al., "Intertumoral heterogeneity within medulloblastoma subgroups," Cancer Cell, vol. 31, no. 6, pp. 737–754.e6, 2017.

Anexos



Figura 1 - Frente de Pareto obtida para o espaço candidato de 1.000 genes, com destaque para a solução selecionada pelo ponto de joelho.



Figura 2 – Frente de Pareto obtida para o espaço candidato de 2.000 genes, com destaque para a solução selecionada pelo ponto de joelho.



Figura 3 – Evolução da aptidão da população ao longo das gerações para o espaço candidato de 1.000 genes.



Figura 4 – Evolução da aptidão da população ao longo das gerações para o espaço candidato de 2.000 genes.



Figura 5 – Matriz de confusão normalizada no conjunto de teste para a configuração com 1.000 genes candidatos e assinatura final de 7 genes.



Figura 6 – Matriz de confusão normalizada no conjunto de teste para a configuração com 2.000 genes candidatos e assinatura final de 14 genes.