

36º CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UFRN – CICT 2025



36º cict

Planeta Água: a cultura oceânica
para enfrentar as mudanças
climáticas no meu território.

ANAIS

EXPEDIENTE

APRESENTAÇÃO

O Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica (CICT) é um evento aberto à comunidade no qual todos os aproximadamente 1.700 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 36ª edição do Congresso teve como tema “Planeta Água: a cultura oceânica para enfrentar as mudanças climáticas no meu território”, 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 9º 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 2026.

Ainda em 2025, a Pró-Reitoria de Pesquisa realizou a 7ª 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 2025 em uma mesa redonda.

O congresso cumpriu três funções valiosas para o desenvolvimento da ciência na instituição: inserção dos discentes em um ambiente acadêmico de publicação e apresentação dos resultados da pesquisa; divulgação científica por meio dos vídeos que utilizam uma linguagem científica, porém acessível a todos; e, por fim, a popularização da ciência.

PROGRAMAÇÃO

Outubro – 2025

15/10 Divulgação da lista dos pré-selecionados para concorrer ao 9º Prêmio Destaque na Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN

Novembro – 2025

03/11 Abertura oficial do evento

03/11 a 07/11 CICT 2025 – Etapa presencial

04/11 a 06/11 Sessões de Apresentações Orais

07/11 Cerimônia de premiação e encerramento do evento

ECT

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

CÓDIGO: ET0101

AUTOR: PEDRO NASCIMENTO DE PAIVA FERNANDES NETO

ORIENTADOR: MARCELO BORGES NOGUEIRA

TÍTULO: Arquitetura Backend para IoT: API de Gerenciamento e Broker para Comunicação com os Dispositivos

Resumo

Este trabalho apresenta a migração de uma API backend de `Node.js` para `Golang` no contexto de uma aplicação IoT.

A versão inicial, desenvolvida em Node.js com o framework Express, oferecia agilidade no desenvolvimento, mas era limitada pela execução `single-thread` e pelo uso restrito de múltiplos núcleos de CPU.

Durante o andamento do projeto — que inicialmente previa apenas melhorias no broker de mensagens — foi identificada a necessidade de maior desempenho e escalabilidade na API. A nova implementação em Golang, utilizando o framework GoFiber, mantém a simplicidade de desenvolvimento do Express, mas aproveita as vantagens de uma linguagem compilada com suporte nativo a concorrência.

Espera-se como resultado menor latência, maior `throughput` e melhor aproveitamento dos recursos de hardware, garantindo maior eficiência e robustez no processamento de dados em tempo real característico de aplicações IoT.

Palavras-chave: Golang, Node, Api, IOT

TITLE: Backend Architecture Transition: From Node.js to Golang in the Context of IoT Applications

Abstract

This work presents the migration of a backend API from `Node.js` to `Golang` in the context of an IoT application.

The initial version, developed in Node.js with the Express framework, provided fast development but was limited by its single-threaded execution model and restricted utilization of multiple CPU cores.

During the course of the project — which initially aimed only at improvements to the message broker — the need for higher API performance and scalability was identified.

The new implementation in Golang, using the GoFiber framework, preserves the development simplicity of Express while leveraging the advantages of a compiled language with native concurrency support.

Expected outcomes include lower latency, higher throughput, and better hardware resource utilization, ensuring greater efficiency and robustness in real-time data processing typical of IoT applications.

Keywords: Golang, Node, Api, IOT

Introdução

Este documento descreve a transição arquitetural realizada em um projeto de aplicação IoT, cujo objetivo foi migrar a API backend de Node.js para Golang, a fim de atender requisitos de desempenho, escalabilidade e paralelismo.

A decisão surgiu a partir de necessidades identificadas durante o desenvolvimento, inicialmente focado em melhorias no broker de mensagens, mas que se estenderam à camada de API.

Metodologia

2. Metodologia

Nesta seção são descritos os passos seguidos para realizar a migração.

2.1 Cenário Anterior

A aplicação era originalmente desenvolvida em Node.js, utilizando o framework Express. Essa escolha inicial proporcionava desenvolvimento rápido e facilidade de integração com o broker, mas apresentava limitações no contexto de alto volume de requisições e baixa latência exigida por aplicações IoT:

Arquitetura single-thread, limitando o uso pleno dos recursos de CPU;

Menor desempenho em operações que exigem alta taxa de processamento paralelo;

Sobrecarga no tratamento de conexões simultâneas em cenários de pico.

2.2 Motivação para a Migração

Durante a execução do plano de trabalho, identificou-se que:

O aumento no volume de dados processados pelo broker demandava uma API mais eficiente;

A arquitetura Node.js, mesmo com técnicas de event loop, não explorava adequadamente o paralelismo do ambiente;

A migração para Golang possibilitaria aproveitar múltiplas threads, melhorando latência e throughput.

2.3 Nova Arquitetura em Golang

A nova API está sendo reimplementada em Golang, linguagem compilada de alto desempenho, com suporte nativo a goroutines e channels para concorrência leve.

Foi adotado o framework GoFiber, cuja API é inspirada no Express, facilitando a adaptação do código.

Principais benefícios:

Melhor aproveitamento de múltiplos núcleos de CPU;

Redução significativa na latência de requisições;

Menor consumo de memória e melhor gerenciamento de conexões;

Código mais enxuto e orientado a alto desempenho.

Resultados e Discussões

3. Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados os testes de desempenho realizados para comparar Node.js e Golang.

3.1 Teste Comparativo de Linguagens

Foi conduzido um teste exploratório comparando o desempenho de Node.js (com Express) e Golang (com GoFiber), utilizando código equivalente que retorna a string "pong" no endpoint /ping.

Código Node.js (Express):

```
-----  
import express from 'express';  
  
const app = express();  
const port = 3000;  
  
app.get('/ping', (req, res) => {  
  res.send('pong');  
});  
  
app.listen(port, () => {  
  console.log('Express rodando em http://localhost:${port}');  
});  
-----
```

Código Golang (GoFiber):

```
-----  
package main  
  
import "github.com/gofiber/fiber/v2"
```

```
func main() {  
  app := fiber.New()  
  app.Get("/ping", func(c *fiber.Ctx) error {  
    return c.SendString("pong")  
  })  
  app.Listen(":3000")  
}
```

3.2 Ambiente de Execução

As duas implementações foram empacotadas em Docker, utilizando imagens otimizadas para produção.

- Golang (GoFiber): 18,4 MB
- Node.js (Express): 129 MB

3.3 Configuração do Teste

O teste de carga foi realizado com o seguinte comando:

```
autocannon -c 100 -d 15 -p 4 http://localhost:3000/ping
```

Parâmetros utilizados:

- -c 100 → 100 conexões simultâneas
- -d 15 → duração de 15 segundos
- -p 4 → fator de pipelining igual a 4

3.4 Resultados Obtidos

(Aqui entram os resultados numéricos ou gráficos que você coletou nos testes.)

Conclusão

A migração de Node.js para Golang representa um passo estratégico no desenvolvimento da aplicação IoT, garantindo maior eficiência no processamento, melhor escalabilidade e menor tempo de resposta.

O uso do GoFiber mantém a simplicidade de desenvolvimento obtida anteriormente com o Express, ao mesmo tempo em que proporciona ganhos significativos de desempenho e robustez.

Referências

- <https://gofiber.io/>
- <https://go.dev/>
- <https://expressjs.com/>

- <https://sambitrazze.medium.com/node-js-vs-go-comprehensive-comparison-with-benchmarks-571148747f13>
- <https://medium.com/%40srishtilal035/node-js-vs-go-the-ultimate-performance-showdown-that-will-change-your-tech-stack-5c58b9f7ac6e>
- <https://docs.gofiber.io/extra/benchmarks/>

Anexos

Tabela da seção 3.4

CÓDIGO: ET0224

AUTOR: ERICK CUSTODIO VITORIA

COAUTOR: PEDRO HENRIQUE SOUSA DE OLIVEIRA XAVIER

COAUTOR: LARA VIRGÍNIA PEREIRA DE MEDEIROS

COAUTOR: FLÁVIO JOSÉ NUNES DE SOUZA

COAUTOR: EDUARDA YASMIM FERNANDES DOS SANTOS

COAUTOR: JOSE JUSSIER SILVA PEREIRA

ORIENTADOR: ALEXANDRE MAGNUS FERNANDES GUIMARAES

TÍTULO: Monitoramento remoto de qualidade das águas fluviais

Resumo

Este projeto busca desenvolver uma estação fluviométrica de baixo custo para monitoramento remoto da qualidade das águas dos rios no Rio Grande do Norte. Utilizando sensores integrados a microcontroladores e tecnologia LoRa, o sistema coleta dados como pH, turbidez, temperatura, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido, transmitindo-os a longas distâncias mesmo em áreas remotas. As informações são processadas localmente e enviadas para um centro de monitoramento, podendo ser acessadas por aplicativo em computador ou smartphone. A iniciativa busca superar limitações orçamentárias e burocráticas enfrentadas por pesquisadores, oferecendo uma alternativa acessível e eficiente para análise em tempo real das condições hídricas. O projeto é desenvolvido por equipe multidisciplinar da UFRN, com foco em ampliar a gestão sustentável dos recursos hídricos e apoiar políticas públicas baseadas em dados confiáveis.

Palavras-chave: Monitoramento. Qualidade da água. Tecnologia LoRa.

TITLE: Remote monitoring of river water quality

Abstract

This project aims to develop a low-cost river monitoring station for the remote monitoring of river water quality in Rio Grande do Norte. Using sensors integrated with microcontrollers and LoRa technology, the system collects data such as pH, turbidity, temperature, electrical conductivity, and dissolved oxygen, transmitting them over long distances—even in remote areas. The information is processed locally and sent to a monitoring center, where it can be accessed via an application on a computer or smartphone. The initiative seeks to overcome budgetary and bureaucratic limitations faced by researchers, offering an affordable and efficient alternative for real-time analysis of water conditions. The project is being developed by a multidisciplinary team from UFRN, with a focus on expanding the sustainable management of water resources and supporting public policies based on reliable data.

Keywords: Monitoring. Water quality. LoRa technology.

Introdução

A qualidade das águas dos rios é um fator essencial para a preservação dos ecossistemas aquáticos e para o fornecimento de água potável às comunidades humanas. Os rios desempenham um papel vital, oferecendo habitat para inúmeras espécies de plantas e animais, além de serem indispensáveis para atividades agrícolas, industriais e recreativas. Entretanto, a poluição representa uma das maiores ameaças à qualidade dessas águas, comprometendo a saúde ambiental e a vida das populações que delas dependem.

A poluição industrial contribui significativamente para a degradação dos rios afetando os ecossistemas aquáticos e a saúde pública. A poluição agrícola também é um problema grave, pois fertilizantes e pesticidas utilizados nas lavouras são carregados pela chuva até os corpos d'água, causando a eutrofização e desestabilizando o equilíbrio natural dos ecossistemas. Além disso, a urbanização desordenada potencializa a contaminação, com o lançamento inadequado de esgotos domésticos e industriais, o que torna muitos rios impróprios para o consumo humano e para atividades de lazer.

A avaliação da qualidade das águas fluviais é realizada por meio de parâmetros físicos, químicos e biológicos. O pH da água, indicador da acidez ou alcalinidade, o oxigênio dissolvido, fundamental para a sobrevivência dos organismos aquáticos, a turbidez, que revela a presença de partículas suspensas, e a temperatura, que interfere diretamente na vida aquática, são alguns dos principais fatores analisados.

Para garantir o monitoramento eficiente da qualidade das águas, diversas tecnologias vêm sendo aplicadas, incluindo técnicas de monitoramento remoto. Sensores embarcados em satélites, drones e aeronaves permitem a captação de dados em grandes áreas, mensurando parâmetros como temperatura superficial, turbidez e concentração de clorofila. Simultaneamente, sensores in-situ instalados diretamente nos corpos d'água realizam o monitoramento contínuo de parâmetros como pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, entre outros, complementando as análises laboratoriais.

Os dados obtidos por esses sensores são transmitidos remotamente para centros de monitoramento, possibilitando o acompanhamento em tempo real das condições ambientais. Ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) integram dados espaciais e ambientais, permitindo identificar áreas críticas, analisar tendências e embasar decisões técnicas e políticas. A aplicação de técnicas avançadas, como inteligência artificial e aprendizado de máquina, potencializa essa análise, tornando possível a detecção precoce de eventos adversos, como poluição ou alterações ambientais significativas.

Diante desse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma estação fluviométrica acessível, composta por sensores conectados a uma plataforma microcontrolada inteligente, capaz de captar, processar e transmitir dados relevantes sobre a qualidade da água em locais remotos. Considerando a dificuldade de acesso e a escassez de infraestrutura em muitas áreas, a transmissão dos dados é realizada via comunicação de longo alcance, garantindo que as informações cheguem a centros de controle ou laboratórios para análise posterior.

Além disso, o sistema inclui o desenvolvimento de um aplicativo para computadores e dispositivos móveis, facilitando o acesso, a visualização e o tratamento dos dados coletados. Essa abordagem multidisciplinar, com a participação de professores e especialistas de diversas áreas, busca oferecer uma solução eficiente, econômica e sustentável para o monitoramento ambiental, contribuindo para a gestão dos recursos hídricos e para a preservação dos ecossistemas aquáticos.

Assim, o projeto visa fortalecer a capacidade técnica de monitoramento das águas fluviais, oferecendo ferramentas que permitam o acompanhamento contínuo e confiável da qualidade da água, com impactos positivos para a saúde pública, a segurança alimentar e a conservação ambiental.

Metodologia

As estações fluviométricas são fundamentais para monitorar e analisar as águas dos rios, fornecendo dados valiosos para a gestão dos recursos hídricos e a preservação dos ecossistemas. A tecnologia LoRa (Long Range) é uma tecnologia de comunicação sem fio desenvolvida especificamente para a Internet das Coisas (IoT), que permite a transmissão de dados de longas distâncias de forma eficiente e econômica, é cada vez mais utilizada nessas estações. Os sensores nas estações coletam dados importantes como temperatura e turbidez, dentre outros, que são transmitidos para um centro de monitoramento via LoRa. A análise desses dados é crucial para entender as condições dos rios, permitindo uma avaliação precisa da qualidade da água e a detecção de eventos. A combinação de microcontroladores com a tecnologia LoRa oferece uma solução completa para a aquisição, processamento, transmissão e recepção de dados dos sensores em estações fluviométricas, garantindo o monitoramento contínuo das águas dos rios (Simas; Facchin, 2020). Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para aquisição de dados fluviométricos, que será útil para a análise da qualidade das águas dos rios no estado do Rio Grande do Norte. O sistema inclui sensores para coleta de informações básicas, um microcontrolador para processar os dados e transmissores/receptores com tecnologia LoRa para enviar/receber os dados à longas distâncias. A segurança dos dados coletados é uma prioridade, com a implementação de mecanismos de autenticação, criptografia e armazenamento seguro. Na estação receptora, os dados são decodificados por outro microcontrolador, que poderá armazená-los, retransmiti-los a um microcomputador ou enviá-los à “nuvem”.

Há a previsão de desenvolvimento de um aplicativo para sistemas operacionais Windows ou Android, permitindo a visualização dos dados por um dispositivo móvel. Este projeto servirá de base para a análise de dados dos Departamentos de Geografia e Ambiental da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Resultados e Discussões

Os dados coletados pelos sensores ligados ao Arduino Uno fornecem uma perspectiva sobre as condições do nosso local de estudo. No estágio atual da pesquisa, foram utilizados sensores de temperatura, turbidez e Tds. O protótipo da estação fluviométrica remota e a estação receptora implementadas são exibidas na Figura 01.

Anteriormente foi utilizado o Microsoft Excel para a obtenção dos dados dos sensores em tempo real e histórico através da porta USB de um PC, mas com o objetivo de melhorar a obtenção de dados e sua visualização adotamos o software ThinkSpeak. Na Figura 02, a turbidez é representada pelo field 1, apresenta variações significativas ao realizar os testes dados em laboratório, indicando que em ambientes reais o mesmo contará com um ótimo rendimento. A temperatura, representada pelo field 2, por outro lado, mostra-se mais estável, o que é típico em ambientes aquáticos onde ocorre uma baixa influência de variações

térmicas rápidas. O field 3, representando o sensor de TDS, apresenta um pouco de instabilidade, isso ocorre devido a falta de calibração, para melhorar os resultados deverá comparar o seu resultado com um sensor mais robusto e assim encontrar um fator de correção.

Conclusão

O desenvolvimento de uma estação fluviométrica de baixo custo baseada em sensores integrados a microcontroladores e comunicação via tecnologia LoRa demonstrou ser uma alternativa viável e eficiente para o monitoramento remoto da qualidade das águas fluviais no Rio Grande do Norte. Os testes realizados com os sensores de temperatura, turbidez e TDS indicam que o sistema possui bom desempenho, especialmente em relação à turbidez, que apresentou variações coerentes com os testes laboratoriais. A estabilidade da temperatura e as observações sobre o sensor de TDS ressaltam a importância da calibração e validação contínua dos equipamentos.

A adoção de plataformas como o ThinkSpeak para visualização dos dados em tempo real representa um avanço em relação aos métodos anteriores, proporcionando maior acessibilidade, controle e análise dos parâmetros monitorados. Além disso, a proposta de integração com dispositivos móveis amplia o alcance e a utilidade da estação, favorecendo sua aplicação em diferentes contextos geográficos, especialmente em regiões remotas com infraestrutura limitada.

Este projeto contribui significativamente para a democratização do acesso a tecnologias de monitoramento ambiental, promovendo o uso sustentável dos recursos hídricos e subsidiando políticas públicas com base em dados confiáveis. Ao alinhar-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU — especialmente o ODS 6 (Água potável e saneamento) e o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) —, a iniciativa reforça o papel da ciência e da tecnologia como ferramentas essenciais para a preservação ambiental e a melhoria da qualidade de vida das populações.

Referências

- Agência Nacional de Águas - ANA. (2012). Estudos Hidrogeológicos para a Orientação do Manejo das Águas Subterrâneas da Região Metropolitana de Natal. Brasília: ANA, 284 p. (Volume 1 – Apêndices). Disponível em: <
<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1a1693f1-68f6-4697-9232-fecb8f42a035>> Acesso em: 22 de set. 2020;
- BRASIL. (2005). Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasil, 18 mar. 2020. p. 01-27;
- DEVALAL, S.; KARTHIKEYAN, A. (2018). LoRa Technology - An Overview, 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, India, pp. 284-290, doi: 10.1109/ICECA.2018.8474715;

MACEDO, Y. M.; TROLEIS, A. L.; ALMEIDA, L. Q. (2021). Risco de Desabastecimento hídrico na região Seridó, Rio Grande do Norte, Brasil, ISSN: 19842295.

SIMAS, G. W.; FACCHIN, M. P. (2020). Implementação de um monitoramento remoto com Radio Lora e MODBUS TCP/IP. Engenharia Elétrica-Pedra Branca. MASTELINI, V. (2023). Desenvolvimento de sistema especialista para análise da qualidade da água para piscicultura de tilápias em tanque-rede: uma aplicação da lógica fuzzy, Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

MILLER, G. T.; SPOOLMAN, S. E. Ciência Ambiental. Editora Cengage. 2015

Anexos

Figura 1. Estação Receptora (a)

Figura 1. Estação fluviométrica remota (b)

Figura 2. ThingSpeak

CÓDIGO: ET0228

AUTOR: FLÁVIO JOSÉ NUNES DE SOUZA

COAUTOR: LARA VIRGÍNIA PEREIRA DE MEDEIROS

COAUTOR: ERICK CUSTODIO VITORIA

COAUTOR: PEDRO HENRIQUE SOUSA DE OLIVEIRA XAVIER

ORIENTADOR: ALEXANDRE MAGNUS FERNANDES GUIMARAES

TÍTULO: Sistema de irrigação e monitoramento inteligente IoT

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de irrigação e monitoramento inteligente baseado em Internet das Coisas (IoT), voltado para comunidades de baixa renda e agricultura familiar. A proposta busca oferecer uma solução tecnológica acessível para otimizar o uso da água, reduzir desperdícios e promover inclusão social por meio da automação de processos agrícolas. O sistema utiliza sensores de umidade do solo, vazão e distância, conectados a microcontroladores Arduino e ESP8266, com transmissão de dados via rede LoRa e visualização em tempo real pela plataforma ThingSpeak.

O protótipo funcional foi concluído e testado em ambientes laboratorial e urbano na UFRN, demonstrando estabilidade na coleta de dados e alcance de comunicação LoRa entre 2 e 3 km. A próxima etapa será a validação em campo, em parceria com o LabNutrir (Laboratório Horta Comunitária Nutrir), que mantém uma horta comunitária dentro da instituição e contribuirá com a aplicação prática do sistema.

Alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 4, 7, 9, 16 e 17, o projeto promove educação tecnológica, eficiência energética, inovação e fortalecimento de parcerias institucionais. Como próximos passos, será integrada inteligência artificial para análise preditiva dos dados e desenvolvido um aplicativo móvel para controle remoto. Os resultados obtidos indicam que a solução é viável, escalável e promissora para diferentes contextos agrícolas e comunidades vulneráveis.

Palavras-chave: Irrigação, agricultura familiar, sistemas embarcados, economia de água

TITLE: Low-Cost Smart IoT Irrigation and Monitoring System to Serve Low-Income Communities

Abstract

This work presents the development of an intelligent irrigation and monitoring system based on the Internet of Things (IoT), designed for low-income communities and small-scale

farming. The project aims to provide an affordable technological solution to optimize water usage, reduce waste, and promote social inclusion through the automation of agricultural processes. The system uses soil moisture, flow, and distance sensors connected to Arduino and ESP8266 microcontrollers, with data transmission via LoRa network and real-time visualization through the ThingSpeak platform.

A functional prototype was completed and tested in both laboratory and urban environments at UFRN, demonstrating stable data collection and LoRa communication range between 2 and 3 km. The next phase involves field validation in partnership with LabNutrir (Laboratory of Biodiversity and Nutrition), which maintains a community garden within the university and will support the practical application of the system.

Aligned with Sustainable Development Goals (SDGs) 4, 7, 9, 16, and 17, the project fosters technological education, energy efficiency, innovation, and institutional collaboration. Upcoming developments include the integration of artificial intelligence for predictive data analysis and the creation of a mobile application for remote system control. Preliminary results indicate that the solution is feasible, scalable, and promising for various agricultural contexts and vulnerable communities.

Keywords: Irrigation, family farming, embedded systems, water efficiency

Introdução

A agricultura é uma atividade essencial para o desenvolvimento econômico e social, especialmente em comunidades de baixa renda, onde a produção de alimentos está diretamente ligada à subsistência e à segurança alimentar. No entanto, a gestão eficiente dos recursos naturais — em especial da água — permanece como um dos principais desafios enfrentados por pequenos produtores e hortas comunitárias. A irrigação, embora fundamental para o crescimento das plantas, é frequentemente realizada de forma manual e imprecisa, o que resulta em desperdícios, aumento de custos operacionais e impactos ambientais negativos.

Nesse cenário, o avanço das tecnologias digitais, como a Internet das Coisas (IoT), abre novas possibilidades para tornar a agricultura mais inteligente, acessível e sustentável. A IoT permite a integração de sensores, microcontroladores e sistemas de comunicação capazes de monitorar variáveis ambientais em tempo real e automatizar processos como a irrigação. Essa abordagem é especialmente relevante para comunidades de baixa renda, pois viabiliza o desenvolvimento de soluções de baixo custo com alto impacto social e ambiental.

Este projeto propõe o desenvolvimento de um sistema de irrigação e monitoramento inteligente baseado em IoT, voltado para aplicação em hortas comunitárias e na agricultura familiar. O sistema utiliza sensores de umidade do solo, vazão e distância, conectados a microcontroladores Arduino e ESP8266, com transmissão de dados via rede LoRa e visualização em tempo real por meio da plataforma ThingSpeak. A proposta busca promover a inclusão tecnológica e a sustentabilidade, contribuindo diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os de número 4 (Educação de qualidade), 7 (Energia limpa e acessível), 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), 16 (Paz, justiça e instituições eficazes) e 17 (Parcerias e meios de implementação).

Além de otimizar o uso da água e reduzir desperdícios, o sistema tem como objetivo capacitar comunidades para o uso de tecnologias digitais, fortalecer parcerias entre universidades e territórios vulneráveis, e fomentar práticas agrícolas mais eficientes, resilientes e responsáveis.

Metodologia

A metodologia adotada neste projeto visa o desenvolvimento e validação de um sistema automatizado de monitoramento e controle da irrigação agrícola, utilizando sensores ambientais, microcontroladores, comunicação LoRa e visualização de dados em nuvem. A pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e tecnológica, e será realizada em ambiente real de cultivo, especificamente na Horta Comunitária do LabNutrir, localizada na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O sistema proposto tem como objetivo otimizar o uso da água na irrigação por meio da coleta de dados ambientais, transmissão eficiente das informações e controle automatizado do fluxo hídrico.

A arquitetura do sistema é composta por um conjunto de sensores conectados a uma plataforma baseada em Arduino, responsável pela coleta dos dados em campo. Os sensores utilizados incluem um sensor de umidade do solo, que monitora as condições hídricas do terreno; um sensor de vazão, que mede o volume de água utilizado durante a irrigação; e um sensor de distância ultrassônico, que será empregado para mensurar o crescimento das plantas ao longo do tempo. Esses dados são processados localmente pelo Arduino e transmitidos via comunicação LoRa para o microcontrolador ESP8266, que atua como receptor central do sistema.

O ESP8266, além de receber os dados transmitidos pelo Arduino, é responsável por enviá-los para a nuvem, utilizando conexão Wi-Fi. A plataforma escolhida para a visualização dos dados é o ThingSpeak, que permite o monitoramento remoto em tempo real por meio de gráficos e painéis interativos. Essa etapa é fundamental para que os pesquisadores possam acompanhar os parâmetros ambientais e operacionais da irrigação, realizar ajustes e tomar decisões com base em dados atualizados. Embora atualmente a visualização ocorra via ThingSpeak, está previsto o desenvolvimento de um aplicativo móvel para Android, que permitirá maior acessibilidade, controle remoto da irrigação e geração de relatórios personalizados.

O sistema também conta com uma válvula solenoide, que será acionada automaticamente com base nos dados de umidade do solo. Essa automação permite que o fluxo de água seja controlado de forma precisa, evitando desperdícios e garantindo que as plantas recebam a quantidade ideal de água conforme sua necessidade. A análise dos dados coletados será realizada com foco na eficiência hídrica, considerando a relação entre o crescimento das plantas, mensurado pelo sensor de distância, e o volume de água utilizado, registrado pelo sensor de vazão. Essa correlação permitirá avaliar o desempenho do sistema e identificar estratégias mais eficazes de irrigação.

Durante esta etapa do projeto, não foi utilizado inteligência artificial, embora sua aplicação esteja prevista para fases futuras. A inclusão de algoritmos de aprendizado de máquina poderá aprimorar a tomada de decisão automatizada, com base em padrões históricos e preditivos, ampliando a capacidade analítica do sistema. A metodologia atual, no entanto,

concentra-se na coleta estruturada de dados, na automação básica da irrigação e na construção de uma base sólida para análises futuras mais complexas.

A escolha da Horta Comunitária do LabNutrir como ambiente de testes reforça o caráter prático e social do projeto, permitindo que a tecnologia desenvolvida seja aplicada em um contexto real e acessível. Espera-se que os resultados obtidos contribuam para a promoção de práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis, com potencial de replicação em outras comunidades e ambientes produtivos. A integração entre sensores, microcontroladores, comunicação sem fio e plataformas de visualização representa um avanço significativo na automação agrícola, oferecendo uma solução acessível e escalável para os desafios da irrigação moderna.

Resultados e Discussões

Até o presente momento, o projeto encontra-se na fase de protótipo funcional, com todos os componentes integrados e operacionais. Os testes realizados foram conduzidos em ambiente de laboratório e em área externa dentro da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em contexto urbano. O foco foi verificar a transmissão de dados via rede LoRa e a coleta de informações dos sensores de umidade do solo, vazão e distância.

Durante os testes de alcance da comunicação LoRa, realizados em áreas abertas da universidade, foi possível estabelecer conexão estável entre os dispositivos em distâncias que variaram entre 2 e 3 km. Esse resultado é bastante expressivo, considerando o ambiente urbano com obstáculos naturais e construções, e reforça a adequação da tecnologia para aplicações em hortas comunitárias e pequenas propriedades rurais. A baixa latência e o baixo consumo energético observados reforçam o potencial da tecnologia LoRa para aplicações em redes de sensores voltadas à agricultura de precisão.

A coleta de dados dos sensores também foi consistente em ambiente laboratorial, permitindo observar variações nos níveis de umidade simulados e o funcionamento adequado do sistema de irrigação automatizado. O acionamento da válvula solenoide com base nos dados coletados foi validado, demonstrando que o sistema é capaz de operar de forma autônoma em resposta às condições ambientais.

Conclusão

O projeto de desenvolvimento de um sistema de irrigação inteligente baseado em IoT demonstrou ser uma solução viável, eficiente e de baixo custo para atender às necessidades de comunidades de baixa renda e agricultores familiares. A construção do protótipo e os testes realizados comprovaram a funcionalidade da arquitetura proposta, com destaque para a coleta precisa de dados ambientais, o acionamento automático da irrigação e a comunicação eficiente via LoRa em longas distâncias.

A integração entre sensores de umidade, temperatura e luminosidade com microcontroladores e atuadores permitiu a criação de um sistema autônomo, capaz de otimizar o uso da água e reduzir desperdícios. A utilização de energia solar e o armazenamento local de dados reforçam o caráter sustentável e adaptável da solução, especialmente em áreas com infraestrutura limitada.

A parceria com a Horta Comunitária do LabNutrir/UFRN abre caminho para a aplicação prática do sistema em ambiente real, possibilitando a coleta contínua de dados e o aprimoramento da tecnologia com base em demandas concretas. Essa colaboração também fortalece o impacto social do projeto, promovendo educação tecnológica, segurança alimentar e inclusão digital.

O projeto está alinhado com diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como inovação, consumo responsável, ação contra mudanças climáticas e fortalecimento de parcerias. Como próximos passos, será implementado um módulo de inteligência artificial para análise preditiva dos dados, além do desenvolvimento de um aplicativo móvel para controle remoto do sistema. Também está prevista a expansão da solução para diferentes tipos de cultivo e contextos geográficos.

Conclui-se que o sistema proposto tem potencial para transformar práticas agrícolas tradicionais, promovendo uma agricultura mais inteligente, sustentável e acessível. A replicação da iniciativa em outras comunidades pode contribuir significativamente para a democratização da tecnologia no campo e para o fortalecimento da agricultura familiar no Brasil.

Referências

- NASCIMENTO, T. L. ; RODRIGUES, K. K. R. P. Agricultura 4.0: uso do ESP32 para a automatização de uma Horta Inteligente. In: XXXIII O Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica, 2022, Natal. Anais eCICT 2022 - Ciências da Vida, 2022., 2022.
- SANTOS, A. P. S. ; NASCIMENTO, T. L. ; RODRIGUES, K. K. R. P. Uso da modelagem 3D para a elaboração de uma horta inteligente. In: XXXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN - eCICT 2020, 2021, Natal. XXXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN - eCICT 2020, 2021.
- ABRANTES, K. K. J. Tecnologia social quintal produtivo - uma estratégia para o Desenvolvimento Rural Sustentável. Revista Econômica do Nordeste, n. 4, p. 61–77, 2015. ISSN 0100-4956/2357-9226.
- AGROJETA. A importancia da irrigação para sua cultura. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.agrojet.com.br/a-importancia-da-irrigacao-para-a-sua-cultura/>>. Acesso em: 24 mai. 2021.
- BRITO, R. A. L.; ANDRADE, C.L. T. Métodos de Irrigação. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_72_16820051120.html>. Acesso em: 23 jun. 2021.
- BRUOF. Qual é a melhor hora do dia para regar as plantas?, 2018. Disponível em: <<https://irrigazine.wordpress.com/2018/08/20/qual-e-a-melhor-hora-do-dia-para-regar-as-plantas/>>. Acesso em: 25 mai. 2021.
- ESTEVES, B. S. Irrigação por gotejamento. Programa Rio Rural, v. 1, n. 32, p. 18, 2012. ISSN 1983-5671.

MAXMAQ. Conheça a irrigação por gotejamento e dobre sua produtividade. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <<https://maxmaq.com.br/blog/irrigacao-por-gotejamento/>>.

REIS, J. S. Sistema de controle aplicado à automação de irrigação agrícola. F. 73. Monografia (Graduação) – UFTP. 2015.

SPIGOLON, R. A. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e irrigação automatizada para cultivo protegido. 2021. F. 44. Monografia (Graduação) – UNIPAMPA.

Anexos

Figura 1 - Receptor

Figura 2 - Transmissor e leitor de dados

Figura 3. LabNutrir

Figura 4. LabNutrir Localização

CÓDIGO: ET0262

AUTOR: MARIA EDUARDA SARAIVA PINHEIRO

ORIENTADOR: HELTON MAIA PEIXOTO

TÍTULO: Controle de Prótese de Mão com Inteligência Artificial de baixo custo controlada por sinais eletromiográficos

Resumo

O presente trabalho refere-se ao desenvolvimento de uma prótese de mão robótica de baixo custo, utilizando um sensor eletromiográfico(EMG) para detectar a atividade muscular do antebraço, com a utilização de eletrodos de superfície, durante os movimentos de abertura e fechamento da mão; a Raspberry Pi Pico W, que é a plataforma de desenvolvimento utilizada para a visualização, o processamento dos sinais e identificar se a mão está aberta ou fechada, com a utilização de um classificador. E utilizamos o módulo de WI-FI presente na placa para mostrar a atividade muscular, na tela do computador durante os movimentos em tempo real.

Palavras-chave: Prótese. Acessível. Eletromiografia. Raspberry.WI-FI.

TITLE: Low-cost Artificial Intelligence-based Hand Prosthesis Control using Electromyographic Signals

Abstract

This work involves the development of a low-cost robotic hand prosthesis using an electromyographic (EMG) sensor to detect forearm muscle activity using surface electrodes during hand opening and closing movements. The Raspberry Pi Pico W is the development platform used for visualization, signal processing, and identifying whether the hand is open or closed using a classifier. We also use the Wi-Fi module on the Raspberry to display muscle activity on the computer screen during movements in real time.

Keywords: Prosthesis. Accessible. Electromyography. Raspberry. WI-FI.

Introdução

No processo de contração muscular, o neurônio motor que inerva o músculo irá produzir um sinal que irá estimulá-lo. Dessa maneira, há a produção de um sinal elétrico, que pode ser medido com sensores eletromiográficos(EMG) que captam essa atividade muscular(WIKIPÉDIA, 2024). A captura deste tipo de sinal por esses sensores permite que utilizemos essa informação para controlar próteses, a partir da análise e processamento desses dados (Elbasiouny, 2024).

Auxiliando assim, pessoas que tiveram a mão amputada e necessitam de uma alternativa para realizar esses movimentos.

Em um estudo realizado por Yamamoto et al.(2019) a qualidade de vida em usuários que possuem próteses no membro superior é significativamente maior do que os que não possuem e além disso a taxa de emprego em tempo integral de pessoas que utilizavam próteses mioelétricas eram mais altas do que as que utilizavam apenas próteses estéticas ou propulsoras.

Desse modo, é possível concluir que a utilização de próteses para pessoas que tiveram o membro inferior amputado é muito importante para o bem estar e inserção dessas pessoas na sociedade.

Assim, esse trabalho propõe o desenvolvimento de uma prótese de mão mioelétrica de baixo custo que realiza os movimentos de abrir e fechar de acordo com o sinal muscular captado pelo sensor EMG, utilizando eletrodos de superfície e processado pela Raspberry Pi Pico W, com o auxílio de um classificador que utiliza esse sinal para fazer a decisão do movimento em tempo real. E a demonstração desses movimentos em tempo real via WI-Fi.

Metodologia

Os sinais musculares gerados pelos movimentos de abrir e fechar a mão foram captados pelo sensor eletromiográfico(EMG) v3 da Advancer Technologies, que foi desenvolvido para ser utilizado com o auxílio de um microcontrolador, possibilitando a leitura do sinal e consequentemente a sua visualização. Esse sensor possui três eletrodos de superfície, ou seja, que são colocados na superfície da pele, sem a necessidade de serem introduzidos diretamente no músculo, sendo assim mais prático e seguro.

O processamento desses sinais foi realizado pela placa de desenvolvimento Raspberry Pi Pico W, que recebe os sinais por um pino analógico ADC, convertendo a tensão em valores digitais, e se mostrou muito eficiente no processo de leitura dos dados recebidos pelo sensor EMG, e também na realização da classificação do estado da mão, utilizando o classificador Decision Tree.

O sensor EMG é alimentado por duas baterias de 9 volts que são conectadas em série, e a Raspberry é conectada a uma power bank que envia 5 volts.

Foi utilizado o software Thonny IDE para a implementação do código, em MicroPython, que faz a aquisição dos dados do sensor, na Raspberry, e também o código que possui o classificador que faz a classificação do gesto da mão.

O classificador utilizado foi o Decision Tree, que é uma técnica de aprendizado de máquina supervisionado, tendo em vista a sua simplicidade e eficiência, uma vez que os gestos analisados são limitados (REMIGIO, 2020).

Assim, ele pega os dados de entrada e a partir da análise das características dos dados e faz uma decisão binária em cada nó e no final da 'árvore' faz a predição do gesto da mão.

Foi utilizada uma taxa de amostragem de 500 Hz, que é considerado suficiente para a captura desse tipo de sinal, sendo possível fazer a distinção dos gestos analisados.

Durante a aquisição dos dados eletromiográficos, o código foi configurado para receber as informações durante 30 segundos, sendo alternados os movimentos de abrir e fechar a mão a

cada 5 segundos, começando com a mão aberta e são exibidas na tela a mensagem de quando realizar a mudança do movimento.

Além disso, esse código também gera um arquivo CSV (Comma-Separated Values) com todos os valores digitais que foram adquiridos e seu respectivo tempo. Sendo assim, foram realizadas 10 repetições deste código que coleta os dados e que seguem esse mesmo padrão de movimento, para ser possível observar a conformidade do sinal durante os movimentos. E com isso também foi possível obter uma quantidade de amostras suficientes para fazer o treinamento do modelo de classificação de maneira mais eficiente.

Após essa etapa de coleta de dados, foi realizada a visualização e processamentos desses sinais. Foi utilizado um filtro passa alta de 20 Hz para eliminar os artefatos de movimento e ruídos e um filtro passa baixa de 250 Hz, que elimina os ruídos de alta frequência e que é o valor máximo de observação desse sinal de acordo com o Teorema de Nyquist, além de um filtro notch de 60 Hz para eliminar a interferência da rede elétrica. Assim, de acordo com o espectrograma é possível observar a distinção do sinal no momento em que a mão está aberta ou fechada e além disso o aumento da magnitude da potência, quando ocorre a contração muscular.

Para realizar o treinamento do modelo do classificador foi necessário fazer a extração das características desse sinal, que é muito importante para o treinamento do modelo, visto que ela faz a transformação dos dados brutos em dados que são úteis para a diferenciação dos estados musculares durante o movimento, dando ênfase às informações importantes do sinal (SPIEWAK, 2018). Nesse caso, foram extraídas o RMS (Root Mean Square), que mede a magnitude do sinal, a partir da raiz quadrada da média do quadrado dos valores (Crechcraft e Gergely, 2002); a média, que é a soma de todos os valores dividido pela quantidade total deles; o desvio padrão, que mede a quantidade de variação dos valores e a waveform length, que é o comprimento cumulativo da forma de onda e seus valores indicam uma medida de amplitude, frequência e duração da onda (IBPAD, 2023).

Posteriormente, foi adicionada uma coluna com os valores dos rótulos, que indica com 0s e 1s o momento em que a mão está aberta ou fechada, a partir de uma estrutura condicional. Assim, facilitando o treinamento do modelo.

Todos esses arquivos que foram gerados, que possuem as características e os rótulos, foram unidos em uma lista, que foi utilizada para fazer o treinamento do classificador Decision Tree, escolhido por ser um modelo simples e eficaz para as necessidades do sistema.

E desse modo, ao alimentar a Raspberry pelo power bank, podemos validar o modelo utilizando o LED interno dela, em que é ligado toda vez que detecta que a mão está aberta e desliga quando está fechada. Além disso, o movimento muscular que está sendo realizado pode ser visualizado na tela do computador, a partir da conexão WI-FI com a Raspberry.

Resultados e Discussões

O modelo treinado a partir dos dados adquiridos pelo sensor EMG e processados pela raspberry pi pico foi eficiente para fazer a detecção do estado da mão, aberta ou fechada, com uma acurácia de 85%. Porém, algumas limitações podem ter interferido na melhor eficácia do sistema, como por exemplo, a interferência de aparelhos eletrônicos próximos e o fato de os eletrodos serem de superfície, o que pode ser mais suscetível a sofrer interferências externas e

o sinal ser mais fraco por ser necessário atravessar a pele. E além disso, o modelo possui apenas a utilização de dois gestos, o que pode limitar a utilização da prótese para realizar atividades que requerem movimentos mais complexos.

A filtragem do sinal foi essencial para a remoção dos ruídos e consequentemente melhorando a qualidade do sinal para ser extraído as suas características de maneira mais eficiente.

Essas características forneceram as informações essenciais sobre o sinal, que permitiram identificar a diferença de quando o músculo está contraído ao fechar a mão e quando está relaxado ao abrir e assim ser possível utilizá-las no treinamento do classificador.

O classificador Decision Tree, apesar de ser um dos mais simples, foi muito eficiente para realizar essa atividade tendo em vista também a limitação dos gestos. E além disso, não necessita de uma grande quantidade de processamento do microcontrolador.

Assim, por enquanto a validação do sistema está sendo realizado pelo LED interno da Raspberry quando ela está alimentada pelo power bank, mas iremos utilizar posteriormente um modelo de prótese virtual que irá realizar os movimentos de abertura e fechamento da mão de acordo com as informações recebidas pela Raspberry.

Conclusão

Esse projeto trata-se do desenvolvimento de uma prótese de mão robótica de baixo custo que é controlada por sinais eletromiográficos adquiridos por um sensor que capta esses sinais que são processados e classificados pela Raspberry Pi Pico W. Com aquisição dos dados do movimento muscular do antebraço pelos eletrodos de superfície do sensor, ao abrir e fechar a mão, e o processamento pela Raspberry Pi Pico, foi possível extrair as características desse sinal e assim treinar um modelo de classificação, que nesse caso foi o Decision Tree, sendo assim capaz de diferenciar o momento em que a mão está aberta ou fechada. Até o presente momento a validação do sistema está sendo feita com o LED interno da Raspberry, em que é ligado toda vez que a mão abre e desligado quando a mão fecha e com a visualização da atividade muscular que é enviada via WI-FI da Raspberry para o computador, porém estamos desenvolvendo a utilização de uma prótese virtual que irá abrir e fechar de acordo com a identificação feita pelo modelo do classificador para validar melhor o sistema.

Referências

WIKIPÉDIA. Eletromiografia. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Eletromiografia>. Acesso em: 23 ago. 2025.

ELBASIOUNY, S. M. The neurophysiology of sensorimotor prosthetic control. BMC Biomedical Engineering, v. 6, art. 9, 1 out. 2024. DOI: 10.1186/s42490-024-00084-y.

YAMAMOTO, M.; CHUNG, K. C.; STERBENZ, J.; SHA UVER, M. J.; TANAKA, H.; NAKAMURA, T.; OBA, J.; CHIN, T.; HIRATA, H. Cross-sectional international multicenter study on quality of life and reasons for abandonment of upper limb prostheses. Plastic and Reconstructive Surgery Global Open, v. 7, n. 5, e2205, 24 maio 2019. DOI: 10.1097/GOX.0000000000002205. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6571339/>. Acesso em: 23 ago. 2025.

REMIGIO, M. Árvores de Decisão — Decision Trees. Medium, 9 ago. 2020. Disponível em: <https://medium.com/@msremigio/%C3%A1rvores-de-decis%C3%A3o-decision-trees-4cb6857671b3>. Acesso em: 19 ago. 2025.

CRECRAFT, D. I.; GERGELY, S. Analog Electronics. 2. ed. [S.l.]: Elsevier, 2002. Cap. 2. DOI: 10.1016/B978-0-7506-5095-3.X5000-4. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780750650953/analog-electronics>. Acesso em: 19 ago. 2025.

IBPAD. Dominando os fundamentos da estatística para ciência de dados. IBPAD - Instituto Brasileiro de Pesquisa e Análise de Dados, 2023. Disponível em: <https://ibpad.com.br/ciencia-dados/fundamentos-estatistica-ciencia-de-dados/>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SPIEWAK, Christopher; ISLAM, Md Rasedul; ZAMAN, Md Assad-Uz; RAHMAN, Mohammad Habibur. A comprehensive study on EMG feature extraction and classifiers. Open Access Journal of Biomedical Engineering and Biosciences, v. 1, n. 1, 2018. Disponível em: <https://lupinepublishers.com/biomedical-sciences-journal/fulltext/a-comprehensive-study-on-eMG-feature-extraction-and-classifiers.ID.000104.php>. Acesso em: 19 ago. 2025.

Anexos

Sistema de aquisição e processamento dos sinais EMG

Espectrograma do sinal EMG durante o movimento muscular na aquisição dos dados

Sistema que detecta o movimento de abertura e fechamento da mão, ligando o LED interna da Raspberry quando detecta que a mão está aberta e desligando quando a mão está fechada

Visualização dos movimentos musculares via WI-FI

CÓDIGO: ET0295

AUTOR: NICOLLE FERNANDA CAVALCANTI BAIMA

ORIENTADOR: LUCIANA DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA

TÍTULO: Análise do Ciclo de Vida Pós-Consumo de Computadores e Periféricos da UFRN

Resumo

A crescente geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) no Brasil tem imposto desafios à gestão ambiental, especialmente diante da disposição inadequada desses materiais. Nas Instituições Públicas de Ensino Superior (IES), o volume descartado amplia a urgência por práticas sustentáveis em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Este estudo analisou o sistema de logística reversa, com ênfase em computadores e periféricos, no contexto de pós-consumo, no Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) em Natal/RN. A metodologia envolveu revisão bibliográfica, análise de documental, observações em campo e entrevistas, além da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) com o software OpenLCA, para identificar impactos ambientais desde o descarte até a destinação final. Foram caracterizados os fluxos institucionais, rotas tecnológicas e etapas de tratamento, evidenciando gargalos de gestão. Os resultados mostraram entraves como a ausência de rastreabilidade dos resíduos, burocracia no descarte patrimonial, dependência de infraestrutura tecnológica de outros estados e fragmentação entre agentes públicos e privados. A ACV destacou o transporte e a ausência de recuperação local de materiais de alto valor agregado como pontos críticos. Conclui-se que a consolidação da logística reversa na UFRN requer práticas de rastreabilidade, otimização dos fluxos de descarte e fortalecimento de parcerias com empresas especializadas.

Palavras-chave: REEE. Instituição de Ensino Superior (IES). Logística Reversa

TITLE: Analysis of the Post-Consumption Life Cycle of Computers and Peripherals at UFRN

Abstract

The growing generation of waste electrical and electronic equipment (WEEE) in Brazil has posed challenges for environmental management, especially given the inadequate disposal of these materials. In public higher education institutions (HEIs), the volume of waste increases the urgency for sustainable practices in line with the National Solid Waste Policy (PNRS). This study analyzed the reverse logistics

system, with an emphasis on computers and peripherals, in the post-consumer context, at the Central Campus of the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN) in Natal/RN. The methodology involved a literature review, document analysis, field observations, and interviews, as well as the application of Life Cycle Assessment (LCA) with OpenLCA software to identify environmental impacts from disposal to final destination. Institutional flows, technological routes, and treatment stages were characterized, highlighting management bottlenecks. The results showed obstacles such as the lack of waste traceability, bureaucracy in asset disposal, dependence on technological infrastructure from other states, and fragmentation between public and private agents. The LCA highlighted transportation and the lack of local recovery of high value-added materials as critical points. It was concluded that the consolidation of reverse logistics at UFRN requires traceability practices, optimization of disposal flows, and strengthening of partnerships with specialized companies.

Keywords: WEEE. Higher Education Institution (HEI). Reverse Logistics

Introdução

O acelerado avanço tecnológico tem impulsionado o uso e descarte de Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE), os quais desempenham papéis importantes nas atividades produtivas, educacionais e de consumo (Schroeder et al., 2015). Contudo, esse crescimento é acompanhado por um aumento expressivo na geração de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), que oferecem riscos ambientais e à saúde humana, devido à presença de substâncias tóxicas como chumbo, mercúrio, cádmio, berílio e arsênio (ABNT, 2024). Por outro lado, esses resíduos possuem um elevado potencial de reciclagem, pois contêm materiais de alto valor agregado, como cobre, ouro e alumínio (Dias et al., 2018).

Enquanto países membros da União Europeia já adotam diretrizes rigorosas para a gestão dos REEE, como a Diretiva 2002/96/CE que impõe aos fabricantes a responsabilidade pela logística reversa e reciclagem (Europa, 2003). No Brasil, os desafios ainda são significativos, mesmo com a existência de instrumentos legais como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010).

De acordo com o The Global E-waste Monitor 2024, mais de 62 milhões de toneladas de REEE foram geradas globalmente em 2022, das quais apenas 22,3% foram coletadas e recicladas (UNITAR, 2024). O Brasil lidera a geração desses resíduos na América Latina e ocupa a segunda posição nas Américas, com mais de 2,1 milhões de toneladas anuais (Baldé et al., 2020). Além de apresentar baixos índices de reaproveitamento de eletroeletrônicos, com apenas 3,3% dos REEE reciclados adequadamente (Rosa, 2025). Esse cenário decorre, em parte, da obsolescência programada, da constante inovação tecnológica e do estímulo ao consumo, que reduzem o tempo de vida útil dos equipamentos (Galvão; Brenzan; Oliveira, 2016).

No contexto regional, o estado do Rio Grande do Norte (RN) reflete esse panorama. Estima-se que cada habitante gera, em média, 11,4 kg de REEE por ano, totalizando 39 mil toneladas anuais, com destaque para a capital, Natal (ASSECOM-

RN, 2024). Diante desse contexto, destaca-se o papel das Instituições de Ensino Superior (IES), devido à constante modernização de seus parques tecnológicos, que são grandes geradoras de REEE. Estudos indicam que uma IES brasileira pode produzir, em média, 1,02 kg de REEE per capita ao ano (Panizzon; Reichert; Schneider, 2017), embora a gestão desses materiais ainda enfrenta entraves como acúmulo de equipamentos obsoletos e restrição de estratégias para destinação adequada (Ribeiro, 2017).

Na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), essa realidade é evidente. Dados do Sistema Integrado de Patrimônio, Administração e Contratos (SIPAC) indicaram, em 2020, a existência de mais de 18 mil microcomputadores registrados, evidenciando o potencial de geração de resíduos no setor de Tecnologia da Informação (TI). Entre os REEE mais presentes estão computadores, mouses, teclados, monitores e impressoras, dispositivos com ciclo de vida curto, composição complexa e risco ambiental elevado (Silva, 2020).

Diante desse cenário, este estudo analisou a logística reversa aplicada ao gerenciamento pós-consumo de computadores e periféricos no Campus Central da UFRN. Para isso, utilizou-se a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a fim de mapear os fluxos de destinação, identificar os impactos ambientais associados e avaliar o desempenho da gestão institucional. A investigação incluiu análise documental, entrevistas, mapeamento de rotas tecnológicas e quantificação de impactos das etapas externas de descarte, como transporte, triagem, reciclagem e destinação final.

A relevância da pesquisa reside na necessidade de fortalecer a rastreabilidade e eficiência da gestão de REEE em IES, promovendo práticas alinhadas à economia circular. Além disso, destaca-se o papel estratégico das universidades na indução de políticas sustentáveis, na formação de profissionais conscientes e no desenvolvimento de soluções eficientes.

Metodologia

A pesquisa foi realizada no Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em Natal/RN, com foco na logística reversa de computadores e periféricos pós-consumo. A abordagem metodológica combinou análise documental, entrevistas, observação em campo e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme as normas NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a, 2009b).

1. **Análise e Diagnóstico do Gerenciamento Pós-Consumo na UFRN**
O diagnóstico abrangeu processos internos e externos de coleta, triagem, transporte, reaproveitamento e destinação final. Foram analisados documentos institucionais, como a Política de Gestão de Ativos (PGA) e normas da Superintendência de Tecnologia da Informação (STI), além de marcos legais como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010). A caracterização das etapas de descarte da UFRN foi obtida por observação em campo e entrevistas, aprovadas pelo Comitê de Ética, com as operadoras locais (Empresa 1 e Empresa 2), responsáveis pela triagem, desmontagem e envio dos resíduos à reciclagem. Também foram identificadas quatro empresas de destinação final (A, B, C e D), especializadas no processamento de diferentes frações

recebidas das operadoras.

2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A ACV avaliou a eficiência e a sustentabilidade das rotas tecnológicas pós-consumo adotadas pela UFRN e empresas parceiras, seguindo as quatro etapas (Figura 1) das normas NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a, 2009b):

2.1 Definição de Objetivo e Escopo

O objetivo foi analisar e quantificar os impactos ambientais do ciclo de vida dos resíduos de computadores e periféricos gerados no Campus Central, desde a geração na UFRN até a sua disposição final nas empresas especializadas (“do portão ao berço”). Foram considerados apenas REEE sem patrimônio, devido à dificuldade de rastreamento dos bens patrimonializados, frequentemente enviados a leilões ou doações em lotes mistos, o que inviabiliza o controle e a obtenção de dados.

No escopo foram considerados:

a) Sistema do produto: cadeia pós-consumo dos REEE sem patrimônio;

b) Função do sistema: destinação adequada dos REEE;

c) Unidade funcional: 1 tonelada de resíduos de desktop padrão (CPU, monitor e periféricos);

d) Fronteira: início da geração (UFRN) e término na disposição final (empresas de reciclagem), incluindo armazenamento, triagem, transporte, desmonte, reciclagem e disposição;

e) Alocação: proporcional à massa dos materiais resultantes da desmontagem e separação de frações (plásticos, metais e componentes complexos);

d) Metodologia: método ReCiPe, abordagem midpoint (H);

e) Categorias de impactos: Aquecimento global (GWP), Potencial de Acidificação (AP), Formação de Ozônio (Ecossistema Terrestre) e Formação de Material Particulado (PMFP);

f) Pressupostos: médias baseadas em dados primários e dados secundários, rastreabilidade total das etapas pós-descarte, descarte em sua totalidade ao fim da vida útil e sem reaproveitamento interno significativo.

g) Limitações: composição dos resíduos estimada, dados incompletos de empresas, escopo restrito ao Campus Central da UFRN e uso de base internacionais.

h) Qualidade dos dados: dados primários coletados em campo e por entrevistas, dados secundários provenientes de literatura científica e bases como European Reference Life Cycle Database (ELCD).

2.2 Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

O inventário incluiu entradas (matérias-primas, energia e insumos) e saídas (emissões e resíduos) associadas aos processos que compõem o sistema. A ICV foi desenvolvida com base em dados primários (campo e entrevistas) e secundários (artigos, relatórios técnicos e bases como o ELCD). Entre os dados secundários utilizados:

a) Composição média de um desktop padrão: 68% metais ferrosos, 12% placas de circuito impresso (PCIs), 8% plásticos, 5% fios e cabos, 5% alumínio, 2% inox (Barraca et al., 2020);

b) Composição média de PCI: 30% a 40% metais, 30% a 50% cerâmicas e 20% a 30% polímeros (Lee et al., 2004; Gouveia; Ferron; Kuno, 2014).

c) Emissões de transportes e consumo de combustível: emissões de CO₂ fóssil, NMHC, NO_x, CO, MP e SO_x de transporte rodoviário e aéreo, estimadas pelas Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2020) e Agência Nacional de

Aviação Civil (ANAC, 2014);
d) Emissões de energia elétrica: emissões de CO₂ da geração de energia elétrica renovável estimadas pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2023);

e) Consumo de energia elétrica: potência média dos equipamentos extraída da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG, 2020).

2.3 Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

A AICV foi conduzida no software OpenLCA, utilizando o método ReCiPe (midpoint H) e o banco de dados ELCD. Essa etapa permitiu converter os dados obtidos no inventário em indicadores ambientais, abrangendo as categorias de Aquecimento Global (GWP), Potencial de Acidificação (AP), Formação de Ozônio no Ecosistema Terrestre e Formação de Material Particulado (PMFP).

2.4 Interpretação

A interpretação envolveu a análise da contribuição percentual das entradas e saídas de cada processo, permitindo identificar os fluxos mais relevantes. Foram realizadas verificações de completude, sensibilidade e consistência, avaliando se os dados estavam completos, o impacto de variações nos parâmetros e a conformidade com os pressupostos do estudo. Por fim, identificaram-se as etapas mais críticas para os impactos ambientais, reconhecendo limitações como a ausência de dados específicos em alguns processos e a dependência de estimativas secundárias.

3. Identificação de Gargalos

A partir dos resultados da ACV e do diagnóstico, foram mapeados pontos críticos como lacunas na rastreabilidade, etapas com maior contribuição para impactos ambientais, limitações operacionais e baixa recuperação de materiais. Esses gargalos foram avaliados segundo critérios de conformidade legal, eficiência operacional e potencial de reaproveitamento, subsidiando recomendações para a gestão dos REEE na UFRN.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos a partir da análise do sistema de logística reversa de computadores e periféricos no Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), a partir do diagnóstico institucional, entrevistas com os atores envolvidos, observações de campo e aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), apresentam dados dos fluxos de descarte e destinação final dos resíduos, identificação de gargalos existentes no sistema atual, bem como a identificação dos impactos ambientais relevantes.

1. Análise e Diagnóstico do Gerenciamento Pós-Consumo na UFRN

A gestão dos REEE na UFRN, especialmente computadores e periféricos, é orientada por legislações, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), o Decreto nº 9.373/2018, que regula a destinação de bens móveis e equipamentos de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) (Brasil, 2018), e a Lei nº 14.479/2022, que estabelece a Política Nacional de Desfazimento e Recondicionamento de Equipamentos Eletroeletrônicos (Brasil, 2022b). No contexto interno, a Resolução Normativa nº 3/2021 estabelece a Política de Gestão de Ativos (PGA), regulando o ciclo de vida dos ativos de TI da instituição (UFRN, 2021).

Apesar do arcabouço legal, o diagnóstico evidenciou entraves operacionais que comprometem a efetividade da gestão, como a exigência de descarte apenas de equipamentos totalmente inservíveis. Como consequência, leva ao acúmulo de itens parcialmente funcionais nos setores, gerando congestionamento de depósitos com dispositivos obsoletos ou danificados.

O fluxo de descarte institucional divide-se em duas modalidades: bens com patrimônio e bens sem patrimônio. Os bens com patrimônio descritos passam por laudos técnicos e trâmites burocráticos até serem enviados ao galpão do Departamento de Material e Patrimônio (DMP), onde são organizados e posteriormente doados ou leiloados. A ausência de rastreamento, contudo, dificulta o monitoramento do destino final. Já os bens sem patrimônio seguem diretamente para uma operadora local licenciada, responsável pela triagem, desmontagem e envio dos resíduos às operadoras de reciclagem (Baima; Lucena, 2024).

A primeira rota (Figura 2), operada pela Empresa 1, envolve os resíduos sem patrimônio. Após o transporte dos resíduos até sua unidade de tratamento físico, ocorre pesagem, triagem e desmontagem, classificando os materiais em recicláveis comuns (plásticos e metais), recicláveis complexos (PCIs) e rejeitos. Os recicláveis simples são enviados a recicladoras regionais, enquanto os complexos seguem para a Empresa C, que realiza o tratamento físico-tecnológico e, posteriormente, os repassa à Empresa D, responsável pelo processamento final. Parte desse material é posteriormente encaminhada à Bélgica, dado que o Brasil não dispõe de tecnologias para recuperação de metais preciosos. Os rejeitos são destinados a aterros licenciados.

A segunda rota (Figura 3), operada pela Empresa 2, refere-se aos REEE com patrimônio adquiridos em lotes. Após o transporte para a unidade de tratamento físico, são realizadas etapas como pesagem, triagem, desmontagem e classificação. Os resíduos recicláveis são encaminhados para empresas especializadas (Empresa A e B), enquanto os rejeitos seguem para aterros licenciados. Já os resíduos complexos são encaminhados para a Empresa D, seguindo a mesma cadeia tecnológica anterior. Diferentemente da primeira rota, toda a operação é registrada em uma plataforma digital, garantindo maior rastreabilidade.

As empresas identificadas no processo final apresentam diferentes níveis de especialização (Quadro 1). A Empresa A, na Paraíba (PB), processa resíduos plásticos eletrônicos, transformando-os em chapas plásticas sustentáveis. A Empresa B, no Rio Grande do Norte (RN), atua na separação e valorização de metais ferrosos e não ferrosos. A Empresa C, também no RN, realiza triagem e desmontagem de REEE, assegurando protocolos de proteção de dados, mas sem reciclagem final. Já a Empresa D, em São Paulo (SP), é especializada na recuperação de metais nobres e conta com certificações ISO 9001 e 14001 (ISO, 2015a, 2015b), além de direcionar o material para tratamento na Bélgica.

2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permitiu avaliar os impactos ambientais associados ao ciclo de vida pós-consumo de computadores e periféricos descartados no Campus Central da UFRN, utilizando o software OpenLCA e considerando uma unidade funcional de 1 tonelada de desktop padrão.

2.1 Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Nesta etapa, apresenta-se um sistema modelado, com base na unidade funcional definida na metodologia de 1 tonelada de resíduos provenientes de computadores, descartados pela UFRN. O inventário contempla os fluxos de entrada e saída dos processos pós-consumo, desde a geração dos resíduos até sua destinação final.

No decorrer do levantamento, verificou-se alguns processos de contribuição ambiental desprezíveis, como o aterro sanitário, cuja a massa residual associada aos rejeitos foi inferior a 1% do total inventariado. Por essa razão, o processo elementar do aterro foi desconsiderado da modelagem quantitativa, porém mantido na descrição do sistema como destinação final dos rejeitos.

Com isso, foi apresentado o fluxograma (Figura 4) de entradas e saídas, que permite visualizar a configuração do sistema, os processos elementares modelados e as interações.

2.1.1 Agregação dos dados significativos

Com base nos dados obtidos, a síntese gráfica de agregação dos dados significativos é principalmente relacionada às emissões das fases de transporte dos resíduos. Entre os modais avaliados, o transporte rodoviário de longa distância revelou-se como o principal responsável pelas emissões, refletindo a dependência histórica nacional por esse modal.

As etapas de desmontagem e triagem realizadas nas empresas não mostram percentuais significativos de emissão no inventário analisado, devido ao consumo energético reduzido e à falta de processos que resultem em emissões diretas relevantes nesta etapa, em comparação às emissões geradas pelo transporte. A agregação permitiu observar os principais poluentes gerados, simplificando a comparação entre os trechos logísticos e as emissões significativas para o ciclo de vida.

Apesar dos transportes a longa distância possuírem os maiores impactos ambientais, se faz necessário analisar o volume de resíduos transportados em cada trecho para compreender a relação entre distância, volume e emissões geradas. Na Tabela 1, observa-se que trajetos curtos, como o transporte da UFRN até a Empresa 1 em Natal (8,7 km), movimentaram grandes volumes de resíduos, enquanto transportes de longa distância interestaduais e internacionais possuem volumes reduzidos, porém resultaram em impactos expressivos devido à distância percorrida e ao uso de transporte rodoviário e aéreo, destacando o transporte como uma etapa crítica na logística reversa dos REEE. Essa análise reforça a necessidade de considerar a regionalização e o processamento local como estratégias de redução de impactos ambientais no gerenciamento pós-consumo.

A Figura 5 apresenta a emissão de seis compostos atmosféricos (CO_2 fóssil, NMHC, NO_x , CO, MP e SO_x), em cada rota de transporte envolvida no ciclo de vida. Verifica-se que o transporte de longas distâncias mostrou os maiores valores estão associados ao transporte para o Centro de Logística da Empresa D em São Paulo, para a Empresa A e para a Empresa D na Bélgica. O CO_2 fóssil é o composto predominante em todas as etapas, reafirmando a importância desse composto.

A Figura 6 representa as emissões totais por cada composto ao longo de todo o ciclo de vida. OCO₂ fóssil foi o poluente predominante (2.179,36 kg), seguido por CO₂ não fóssil (19,80 kg), NMHC (14,43 kg) e NO_x (5,15 kg), sendo SO_x e MP quase desprezíveis. O CO₂ não fóssil teve menor relevância climática por estar associado a fontes renováveis.

2.2 Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) identificou as categorias de impacto ambiental mais significativas relacionadas à etapa de transporte dos REEE, pois foram as etapas mais relevantes de todo o processo. Os dados foram modelados através do método ReCiPe midpoint (H). As emissões atmosféricas geradas nos transportes foram convertidas em impactos ambientais com base em fatores de caracterização específicos.

Na Figura 7, observa-se que na categoria Aquecimento Global (GWP), destacam-se os trechos para SP e Bélgica, com mais de 1.700 kg CO₂-eq. Já a Formação de Ozônio apresentou valores relevantes, especialmente no transporte para São Paulo (7,657 kg), devido à emissão de compostos orgânicos voláteis. O Potencial de Acidificação (AP) também foi mais elevado nas rotas longas, enquanto a Formação de Material Particulado (PMFP) teve menor representatividade, mas esteve associada ao transporte rodoviário e aéreo.

Dessa forma, os dados evidenciam que a logística de transporte, principalmente de longa distância, é a principal responsável pelos impactos ambientais do ciclo de vida estudado, reforçando a necessidade de estratégias de otimização logística, regionalização de tratamento e redução do uso de combustíveis fósseis.

2.3 Interpretação

A etapa de interpretação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consistiu na análise crítica dos resultados obtidos nas etapas de inventário (ICV) e avaliação de impactos (AICV). Essa etapa reúne os achados relevantes, verifica a consistência dos dados e valida as conclusões frente aos objetivos do estudo.

A interpretação foi conduzida através das seguintes partes:

a) Identificação de resultados relevantes: os maiores valores foram de CO₂ fóssil, seguido pelo CO₂ não fóssil, porém com relevância climática reduzida em comparação ao fóssil. Foram identificadas as principais fontes de impacto, como as rotas rodoviárias de longa distância e o transporte aéreo internacional;

b) Verificação de qualidade e coerência:

- Completude: etapas com baixa representatividade (como o processo de aterro) foram justificadas e excluídas por apresentarem impactos desprezíveis. Além disso, para reforçar a coerência dos resultados, foi realizada comparações com estudos similares, destacando que os resultados quanto à relevância do transporte como etapa crítica em termos de emissões, alinhados com os achados de Ekvall (2007), que identificaram o transporte como um dos principais pontos de impacto em ACV aplicadas a resíduos;

- Consistência: verificou-se os métodos, dados e modelagens adotadas alinhadas com o objetivo e escopo da ACV;
- Sensibilidade: influência das estimativas adotadas, especialmente para processos com ausência de dados primários. Nesses casos, foram utilizados dados secundários e valores médios baseados em literatura técnica e bases secundárias.

Por fim, a análise permitiu identificar problemas ambientais associados à logística e ao consumo de combustíveis fósseis, além de sugerir possíveis melhorias, como a redução de distâncias percorridas, fortalecimento da logística local e incentivos ao tratamento regional dos resíduos. Também foram reconhecidas limitações relacionadas à disponibilidade de dados específicos e à utilização de bancos de dados internacionais. A dificuldade de quantificação do volume de REEE encaminhados pela UFRN impede que se mensure o impacto ambiental e operacional da instituição, comprometendo a completude e a representatividade dos dados da ACV.

3. Identificação de Gargalos

A integração dos resultados da ACV e do diagnóstico revelou gargalos tanto institucionais quanto externos. Internamente, os trâmites para descarte de bens patrimoniais atrasam a destinação, e a ausência de registros precisos, como pesagem e contagem de resíduos, dificultam a formulação de inventários e estratégias de economia circular. A falta de rastreabilidade após doações e leilões compromete o controle sobre o destino final, visto que é limitada e dificulta o monitoramento e a transparência quanto ao destino dos bens públicos.

Externamente, a fragmentação da cadeia e a ausência de um sistema padronizado de monitoramento limitam a cooperação entre agentes e a responsabilização ambiental. A dependência de empresas em outros estados e no exterior aumenta custos logísticos e reduz a autonomia regional. Ao comparar as rotas, a Empresa 2 apresenta maior rastreabilidade via plataforma digital, mas ainda depende de terceiros para destinação final; já a Empresa 1 opera de forma mais isolada, com menor integração tecnológica.

Esses gargalos reduzem a eficiência e dificultam a implementação de soluções sustentáveis para o ciclo de vida dos REEE na UFRN, reforçando a necessidade de medidas voltadas à rastreabilidade, regionalização do tratamento e fortalecimento da logística local.

Conclusão

O estudo possibilitou compreender e avaliar, de forma integrada, a logística reversa aplicada ao gerenciamento pós-consumo de computadores e periféricos no Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), utilizando a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta metodológica de análise. Os resultados revelaram a relevância e a complexidade envolvidas na gestão dos REEE, demonstrando que, apesar de avanços institucionais, como a implementação da Política de Gestão de Ativos (PGA) e o alinhamento com a Política Nacional de

Resíduos Sólidos (PNRS), ainda persistem obstáculos que comprometem a sustentabilidade do sistema.

Entre os principais gargalos identificados, destacam-se a ausência de rastreabilidade dos resíduos, a burocratização no processo de descarte patrimonial, a fragmentação da articulação entre os agentes públicos e privados, bem como a limitação da infraestrutura local para reciclagem de materiais de alto valor agregado, indicam a necessidade de aprimoramento das práticas institucionais e regionais. Somam-se esses fatores a dependência de empresas externas e a necessidade de exportação de componentes para outros estados e países, eleva os custos logísticos e os impactos ambientais relacionados, além de restringir o potencial de economia circular em escala local.

A aplicação da ACV mostrou-se eficaz para identificar pontos críticos ao longo das rotas tecnológicas adotadas, evidenciando o transporte como a etapa de maior relevância ambiental. Tais resultados reforçam a importância da adoção de estratégias que privilegiem o rastreamento dos fluxos de descarte, a regionalização do processamento e a redução das distâncias percorridas, contribuindo não apenas para a mitigação dos impactos ambientais, mas também para o aproveitamento econômico dos materiais recuperados.

Dessa forma, o estudo contribui para o fortalecimento de políticas institucionais e públicas voltadas à gestão dos REEE, reforçando o papel da UFRN como instituição. Recomenda-se a ampliação das estratégias de educação ambiental no ambiente acadêmico, a aprimoração das parcerias com empresas especializadas e a implementação de sistemas de rastreamento e monitoramento dos resíduos para consolidar uma logística reversa efetiva, alinhada ao progresso da economia circular na UFRN.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil: Ano-Base 2013. Brasília, DF, 2014. 78 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Portaria nº 17, de 20 de janeiro de 2020**: Publica os parâmetros de cálculo utilizados para a obtenção dos coeficientes dos pisos mínimos de que trata a Resolução ANTT nº 5.867, de 14 de janeiro de 2020. Brasília, DF, 20 jan. 2020. Disponível em: https://anttlegis.antt.gov.br/action/UrlPublicasAction.php?acao=getAtoPublico&sgl_tipo=POR&num_ato=00000017&seq_ato=ATT&vlr_ano=2020&sgl_orgao=SUROC/ANTT/MI&cod_modulo=161&cod_menu=5411&print=S. Acesso em: 26 maio 2024.

ASSECOM-RN. **Campanha RN+Limpo ultrapassa a meta de 150 toneladas de resíduos eletrônicos reciclados do estado**: Solenidade nesta quarta-feira (06) celebrará o resultado e reunirá parceiros da campanha. 2024. Disponível em: <https://www.rn.gov.br/materia/campanha-rnlimpo-ultrapassa-a-meta-de-150-toneladas-de-residuos-eletronicos-reciclados-do-estado/>. Acesso em: 08 mai. de 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos sólidos, classificação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. 77 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida: princípios e estrutura - Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Rio de Janeiro. 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Rio de Janeiro. 2009b.

BAIMA, N.F.C.; LUCENA, L.F.L. A Gestão De Resíduos De Equipamentos Eletroeletrônicos Em Instituições Federais De Ensino À Luz Das Políticas Voltadas Para O Setor Público - Um Estudo De Caso No Rn. In: **SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (SILUBESA)**, 21., 2024, Recife. Anais... Recife: ABES, 2024. p. 1–10.

BARRACA, Marcelo Aparecido, BUNCHAFT, Antonio, REGIS, Adherbal de Almeida, CRUZ, Uilmer Rodrigues Xavier da. **Manual de procedimentos de coleta, reciclagem e disposição correta de resíduos eletroeletrônicos para integração das redes de organizações de catadores**. 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/manual/tecnologia/residuos-eletroeletronicos>. Acesso em: 24 jun. 2025.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 159, n. 9, p. 1-8, 13 jan. 2022a.

BRASIL. Decreto Nº 9.373, de 11 de maio de 2018. **Dispõe sobre a alienação, a cessão, a transferência, a destinação e a disposição final ambientalmente adequadas de bens móveis no âmbito da administração pública federal direta, autárquica e fundacional**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9373.htm. Acesso em: 14 jun. 2024.

BRASIL. Lei nº 14.479, de 21 de dezembro de 2022. Institui a Política Nacional de Desfazimento e Recondicionamento de Equipamentos Eletroeletrônicos e dispõe sobre o Programa Computadores para Inclusão. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 22 dez. 2022b.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). **Potência média de aparelhos residenciais e comerciais**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/10/POTENCIA-MEDIA-DE-APARELHOS-RESIDENCIAIS-E-COMERCIAIS.pdf>. Acesso em: 26 maio 2025.

DIAS, P.; MACHADO, A.; HUDA, N.; BERNARDES, A. M. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 7-16, 2018.

EKVALL, T.; ASSEFA, G.; BJÖRKLUND, A.; EIKSSON, O.; FINNVEDEN, G. What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management.

Waste Management, v. 27, n. 8, p. 989-996, 2007. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.02.015.

EUROPA. Directiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 27 de janeiro de 2003, relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE) - Declaração comum do Parlamento Europeu, do Conselho e da Comissão relativa ao Artigo 9º. **Jornal Oficial**, nº L 037, p. 0024 - 0039, 2003. Disponível em: <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0096:PT:HTML>. Acesso em: 13 mar. 2025.

GALVÃO, H.M.; BRENZAN, R.; OLIVEIRA, L.M. de. A logística reversa aplicada na política nacional de resíduos sólidos e na lei estadual paulista do resíduo tecnológico em Pindamonhangaba – SP. **Revista Diálogo**, Canoas, n. 33, p. 141-169, dez. 2016. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Diálogo/article/view/2238-9024.16.48>. Acesso em: 13 mar. 2025.

GOUVEIA, N.; FERRON, M. M.; KUNO, R. **Os impactos dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos na saúde**. p.113-128. In: CARVALHO, T. C. M. B.; XAVIER, L. H. Gestão de Resíduos Eletroeletrônicos: uma abordagem prática para a sustentabilidade. Ed.1, Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **14001:2015** – Environmental management systems – Requirements with guidance for use. Genebra: ISO, 2015a. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/60857.html>. Acesso em: 2 jul. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **9001:2015** – Quality management systems – Requirements. Genebra: ISO, 2015b. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/62085.html>. Acesso em: 02 jul. 2025.

LEE, C. H.; CHANG, C. T.; FAN, K. S.; CHANG, T. C. An overview of recycling and treatment of scrap computers. *Journal of Hazardous Materials*. v. 114, n. 1-3, 2004, p. 93-100, Elsevier.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INFORMAÇÃO (MCTI). **Fator Médio - Inventário Corporativo**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em: 07 jul. 2025.

PANIZZON, T.; REICHERT, G. A.; SCHNEIDER, V. E. Avaliação da geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEEs) em uma universidade particular. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 625-635, 2017.

RIBEIRO, E.L. **Resíduos Eletroeletrônicos no Governo Federal: normas e procedimentos para descarte de materiais de informática**: o caso do Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro (CEFET/RJ). Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2017.

SCHROEDER, A. M.; NETO, G. C. O.; PINTO, L. F. R.; BAPTISTA, E. A. Benefícios econômicos e ambientais da reciclagem e reuso de resíduos eletroeletrônicos:

Estudo de caso em um centro de reciclagem especializado em São Paulo. In: **XII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, 2015, Resende. Anais... Resende, 2015

SILVA, I. R. S. **Diagnóstico e proposição de melhorias no gerenciamento dos resíduos eletroeletrônicos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte**. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

ROSA, Bruno. **No Brasil, reciclagem atinge só 3,3% dos eletrônicos**. 2025. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/noticia/2025/02/17/no-brasil-reciclagem-atinge-so-33percent-dos-eletronicos.ghtml>. Acesso em: 06 abr. 2025.

UNITED NATIONS INSTITUTE FOR TRAINING AND RESEARCH (UNITAR). **The Global E-waste Monitor 2024**: Electronic Waste Rising Five Times Faster than Documented E-waste Recycling. Bonn: ITU; UNITAR, 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE (UFRN). **Resolução Normativa Nº 3/2021, de 08 de junho de 2021**: Aprova normas gerais referentes à Política de Gestão de Ativos de Tecnologia da Informação na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. Disponível em: <https://sipac.ufrn.br/sipac/VerInformativo?id=174330>. Acesso em: 14 jun. 2024.

Anexos

Figura 1 - Fases da ACV.

Figura 2- Rota Tecnológica dos REEE sem patrimônio.

Figura 3 - Rota Tecnológica dos REEE sem patrimônio.

Quadro 1 - Perfil das empresas atuantes na etapa final de REEE.

Figura 4 - Fluxograma com entradas e saídas do gerenciamento dos REEE sem patrimônio na UFRN.

Tabela 1 - Distância, volume e tipo de resíduo transportado nas rotas de logística reversa de REEE da UFRN

Figura 5 - Emissões atmosféricas por composto nas etapas de transporte dos REEE.

Figura 6 - Emissões totais (kg) por composto no ciclo de vida dos REEE.

Figura 7 - Impactos ambientais por categoria (kg equivalente) nas etapas.

CÓDIGO: ET0444

AUTOR: MARCOS AURELIO TAVARES FILHO

COAUTOR: MARINA LUCENA ARAUJO

ORIENTADOR: HELTON MAIA PEIXOTO

TÍTULO: Comunicação Colaborativa entre Drone e Carro Robótico para Navegação Autônoma

Resumo

Este artigo apresenta o desenvolvimento de comunicação colaborativa entre drone e carro robótico para navegação autônoma, através do uso de protocolos de rede sem fio. Para esta análise, utilizou-se um carro robótico com peças de impressão 3D e os drones DJI Tello e Parrot AR2. Por fim, concluiu-se que é concebível a utilização de protocolos como MQTT, HTTP e UDP para o estabelecimento de uma comunicação eficiente entre os dispositivos.

Palavras-chave: Comunicação Colaborativa. Drone. Carro Robótico. Impressão 3D.

TITLE: Collaborative Communication between Drone and Robotic Car for Autonomous Navigation

Abstract

This paper presents the development of a collaborative communication between a drone and a robotic car for autonomous navigation through wireless networks. For this analysis, a 3D-printed robotic car, as well as DJI Tello and Parrot AR2 drones, were used. In the end, it was possible to assert that protocols, such as MQTT, HTTP, and UDP, are efficient for establishing communication between devices.

Keywords: Collaborative Communication. Drone. Robotic Car. 3D-printed.

Introdução

Com o avanço das pesquisas em robótica e visão computacional, cada vez mais aspectos de sistemas robóticos distribuídos - isto é, de enxames de robôs em colaboratividade - vêm sendo revelados e implementados. Entre as suas principais aplicações estão a comunicação, localização, mapeamento e exploração, o transporte de objetos e a coordenação de movimentos (PARKER, 2000).

Dentre os sistemas caracterizados pela comunicação entre múltiplos robôs, o presente trabalho dedica-se a explorar a integração entre um carrinho robótico terrestre e robôs aéreos, do tipo drone. Sobre esse panorama, a utilização de robôs aéreos em cooperação com robôs terrestres, quando comparada às soluções que envolvem somente uma das modalidades, pode trazer uma série de vantagens. Especialmente, o maior campo de visão para a captura de imagens pelos robôs aéreos, o que permite alcançar regiões não acessadas pelos robôs terrestres, associada à capacidade dos últimos de aproximar-se de objetos ou obstáculos de interesse, obter informações mais detalhadas, e interagir diretamente com elementos do ambiente, enriquece o rol de possibilidades para aplicação desses sistemas (BORTOLINI DE SÁ, 2014).

Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho, a compreensão do desempenho do drone, do carrinho robótico e suas respectivas câmeras foi essencial. Inicialmente, o projeto contou com um drone do tipo DJI Tello, de dimensões 98mm x 92.5mm x 41mm e 80g de massa. Sua câmera, com campo de visão de 82.6°, é capaz de gravar vídeos HD 720p 30fps e 720p no streaming. Posteriormente, foram realizados testes com um drone Parrot AR 2.0, maior que o último e com massa superior a 300g, que dispõe de uma câmera HD, capaz de capturar vídeos em 720p a 30fps com uma lente grande angular de 92°. Adicionalmente, o dispositivo conta com sensores de altitude por ultrassom, que auxiliam no controle e estabilidade do seu voo.

O carro robótico utilizado, por sua vez, apresenta sua base estrutural a partir da modelagem e impressão 3D adequadas aos componentes incorporados e necessários à sua função. Sobre isso, destacam-se a placa de microcontrolador ESP 32 e uma ESP 32-CAM. A primeira, imprescindível para a integração do carrinho aos demais dispositivos em comunicação colaborativa e controle de seus movimentos. A última foi a responsável pela captura das imagens na perspectiva do carrinho.

Nesse sentido, visando a implementação da comunicação colaborativa entre dispositivos para a resolução de problemas de navegação em tempo real, estabeleceu-se um processo de aquisição e processamento de imagens, simulações, testes ao ar livre e em ambiente controlado conforme mostrado no Figura 01.

Na Figura 01, a primeira etapa consistiu na aquisição de imagens das câmeras do carro robótico (ESP32-CAM - OV2640) e dos drones DJI Tello e Parrot AR2 (integradas). Esse processo de obtenção das imagens se adequou a cada dispositivo. No caso da ESP32-CAM, utilizou-se o Hypertext Transfer Protocol (HTTP) em virtude da simplicidade de implementação e compatibilidade com redes sem fio. No que diz respeito aos drones, o protocolo User Datagram Protocol (UDP) foi selecionado por causa do suporte nativo oferecido pelo DJI Tello e Parrot AR2, alta capacidade de transmissão em tempo real e baixa latência.

Na segunda fase, as imagens adquiridas foram encaminhadas para um servidor local, onde o processamento e tomada de decisão acontece. Nele, através de bibliotecas de processamento de imagens, como o Pillow e o OpenCV, houve a extração de características relevantes para a colaboratividade. No escopo deste trabalho, os atributos enviados consistiam na identificação de uma bola vermelha na imagem através da arquitetura YOLOv11 (ULTRALYTICS, 2024).

Com o objetivo de gerar um modelo classificador baseado no YOLOv11, a montagem da base de dados para identificar a bolinha vermelha, isto é, o evento esperado, aconteceu com a coleta de, a princípio, 265 imagens em ambientes controlados e ao ar livre. A posteriori, porém, esse número aumentou para 627 por meio da variação de saturação, luminosidade, ruído e desfoque. A Tabela 01 mostra a quantidade de imagens alocadas para treinamento, teste e validação. Ainda, nessa fase, houve o estabelecimento de quadrantes que permitem identificar em qual espaço da imagem está o objeto desejado. Isso foi crucial para a tomada de decisão.

Com essas informações, no terceiro passo do processo, decisões sobre o movimento do carrinho e do drone são tomadas com baixa latência. Para isso, delimitou-se quais são as possíveis ações de cada aparelho. No que tange ao móvel terrestre, o sistema implementado executava as seguintes: ir para frente, dar ré e girar em torno de 15 graus. No veículo aéreo não tripulado, os comandos abrangiam: levantar voo, aterrissar, rotacionar para esquerda e direita (em graus), avançar e recuar.

Após isso, o servidor envia para o drone (UDP) e para o carrinho, usando Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), quais são suas próximas ações. Vale ressaltar que MQTT foi escolhido devido a sua flexibilidade, escalabilidade e eficiência no âmbito da Internet das Coisas (IoT).

Na última etapa, simulações e testes foram feitos com o intuito de validar a comunicação. Os experimentos conduzidos ocorreram separadamente. Assim, o carrinho não estava integrado com o drone. Tal escolha foi feita para melhor depuração do funcionamento de cada dispositivo.

Sobre as tecnologias empregadas, utilizou-se as linguagens de programação Python, no tratamento das imagens e processamento das mensagens, C++, para a movimentação do carrinho, e os sistemas operacionais Windows 11 e Ubuntu 22.04. Desse modo, é notável que a metodologia adotada enfatiza procedimentos experimentais para a implementação de comunicação colaborativa entre veículos.

Resultados e Discussões

O acesso das imagens em tempo real ocorreram de forma satisfatória. Para o carrinho, a utilização do servidor web disponibilizado pela ESP 32-CAM permitiu a integração com o processamento de vídeos em OpenCV. No que diz respeito aos drones, tal conexão, que aconteceu via Interfaces de Programação de Aplicações (APIs) em Python, demonstrou granulação, ruídos e instabilidades no Windows 11, como é possível de ver na Figura 02.

Esse problema, entretanto, foi resolvido ao usar o sistema operacional Ubuntu 22.04 com a liberação de portas de comunicação UDP. A Figura 03 mostra o resultado das capturas de cada dispositivo após migrar para um sistema Linux.

Com o sucesso da aquisição, o teste do modelo gerado se tornou prioridade. Inicialmente, percebeu-se o erro de underfitting, ou seja, ausência de classificação eficaz em decorrência de poucas imagens relevantes ao contexto de experimentação. Consecutivamente, no entanto, esse panorama melhorou com a remoção de dados destoantes (outliers) e o aumento de dados sobre o ambiente de testes.

Diante desse contexto, a aplicação de quadrantes à imagem ajudou a identificação de qual decisão deve ser tomada nos veículos. A Figura 04 ilustra o vetor que guia o movimento do drone.

Com a tomada da decisão, o envio da mensagem em MQTT obteve sucesso dentro do escopo de testes laboratoriais. O delay da mensagem, isto é, o tempo que a informação leva indo do servidor (broker) para o microcontrolador do carrinho, foi em torno de 2 segundos em uma amostra de 25 testes. Na parte da comunicação com os drones (UDP), as simulações demonstraram a ocorrência de certas perdas de informações referentes ao envio e recebimento de mensagens, como a integridade da imagem e o comando. Tal comportamento já era previsto, uma vez que a prioridade era a velocidade da informação e não sua total integridade.

Ademais, vale ressaltar que os drones, após certo tempo transmitindo vídeo, tiveram a execução de comandos de movimentação comprometidos em virtude da baixa bateria. Assim, notou-se que, quando o AR Parrot2 e o DJI Tello ficam com nível de energia menor que 15%, há o comprometimento da movimentação aérea.

Conclusão

O presente trabalho demonstra que o estabelecimento de comunicação para navegação autônoma é concebível utilizando rede sem fio. Apesar do estudo não ter contemplado a comunicação de forma completa, ou seja, entre o carrinho e o drone integrados entre si, o desempenho em cada dispositivo com o servidor foi satisfatório, com um tempo menor que 2 segundos.

É importante ressaltar que os possíveis próximos passos deste estudo são: testar outros protocolos de baixa latência como o Real-Time Messaging Protocol e Secure Reliable Transport, integrar os dispositivos e embarcar o servidor para respostas com uma margem de tempo menor.

Referências

BORTOLINI DE SÁ, F. **Cooperação entre um Robô Aéreo e um Robô Terrestre para Identificação de Rotas Livres em Solo.**[S.l.: S.n.].

PARKER, L. E. et al. **Current state of the art in distributed robot systems.**[S.l.]: Springer, 2000.

ULTRALYTICS. **Ultralytics YOLO11.** Disponível em:
<<https://docs.ultralytics.com/pt/models/yolo11/>>. Acesso em: 28 ago. 2025.

Anexos

Figura 01: Planejamento do fluxo de trabalho para o estabelecimento de comunicação colaborativa.

Tabela 01 – Distribuição das imagens coletadas na base de dados

Figura 02: Granulação da imagem (em tons de cinza) do DJI Tello capturada via protocolo UDP.

Figura 03: Imagens da ESP 32-CAM e do DJI Tello capturadas via protocolos HTTP e UDP no Ubuntu 22.04, respectivamente.

Figura 04: Imagem do DJI Tello processada com grades, identificação de bolinha vermelha e vetor diretor do movimento.

CÓDIGO: ET0477

AUTOR: LUAN DE SOUZA FRANÇA

ORIENTADOR: MARY LUCIA DA SILVA NOGUEIRA

TÍTULO: Levantamento de processos minerários no mar da margem equatorial brasileira

Resumo

Brazil has been implementing a set of public policies focused on energy transition and security, prioritizing areas such as power generation and transmission, the Luz para Todos (Light for All) program, energy efficiency, oil and gas, mineral research, and low-carbon fuels, under the coordination of the Ministry of Mines and Energy (MME). With regard to mineral research, a key milestone is Decree No. 10,657 of March 24, 2021, which established the Strategic Minerals Program (Pró-Minerais Estratégicos). This decree defines as strategic those minerals that meet at least one of the following criteria: high import dependency for vital sectors, application in high-technology products and processes, or economic relevance with potential to generate a positive trade balance. Resolution No. 2 of June 18, 2021, specifies the minerals that fall within these criteria. In this context, the proposed work plan aims to support the research project “Mining in the Sea of the Brazilian Equatorial Margin”, which seeks to investigate the mineral potential of the maritime region of Brazil’s Equatorial Margin. The methodology employed included the acquisition of prior knowledge, data collection and processing, as well as integration and contextualization of the results. The project was divided into three phases: understanding mining processes in the Equatorial Margin (4 months), detailed process analysis (2 months), and the development of a case study in the State of Rio Grande do Norte (3 months)

Palavras-chave: Transição energética, Minerais estratégicos, Mineração marinha e Suste

TITLE: Survey of Mining Processes in the Sea of the Brazilian Equatorial Margin

Abstract

Brazil has been implementing a set of public policies focused on energy transition and security, prioritizing areas such as power generation and transmission, the Luz para Todos (Light for All) program, energy efficiency, oil and gas, mineral research, and low-carbon fuels, under the coordination of the Ministry of Mines and Energy (MME). Regarding mineral research, the highlight is Decree No. 10,657 of March 24, 2021, which established the Strategic Minerals Program (Pró-Minerais Estratégicos). This decree defines as strategic those minerals that meet at least one of the following criteria: high import dependency for vital sectors, application in high-technology products and processes, or economic relevance with potential to generate a positive trade balance. Resolution No. 2, of June 18, 2021, specifies the minerals that fall under these criteria. In this context, the proposed work plan aims to support the research project “Mining in the Sea of the Brazilian Equatorial Margin”, which seeks to investigate the mineral potential of the maritime area of Brazil’s Equatorial

Margin. The methodology applied includes acquisition of prior knowledge, data collection and processing, integration, and contextualization of results. The project was divided into three phases: understanding of mining processes in the Equatorial Margin (4 months), detailed process analysis (2 months), and the development of a case study in the State of Rio Grande do Norte (3 months). These activities are ess

Keywords: Energy transition, Strategic minerals, Marine mining e Sustainability

Introdução

Um conjunto de políticas públicas direcionadas a transição e segurança energética no Brasil assume como eixos prioritários a geração de energia, luz para todos, transmissão de energia, eficiência energética, petróleo e gás, pesquisa mineral e combustível de baixo carbono, MME. A pesquisa mineral, através do Decreto nº 10.657, de 24 de Março de 2021, Pró-Minerais Estratégicos, no Art. 2º define minerais estratégicos para o Brasil em 3 critérios: I - bem mineral do qual o País dependa de importação em alto percentual para o suprimento de setores vitais da economia, II - bem mineral que tenha importância pela sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia, III - bem mineral que detenha vantagens comparativas e que seja essencial para a economia pela geração de superávit da balança comercial do País. Posteriormente a Resolução Nº 2, de 18 de junho de 2021, define a relação de minerais estratégicos para o País, de acordo com os critérios de que trata o art. 2º do Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. O presente plano de trabalho tem como objetivo geral identificar e caracterizar os processos minerários situados em ambientes marinho e terrestre da Margem Equatorial Brasileira, com ênfase nas substâncias minerais enquadradas no critério II do Art. no contexto do programa Pró-Minerais Estratégicos. Esta iniciativa dará suporte técnico e metodológico às ações do projeto de pesquisa “Mineração no Mar da Margem Equatorial Brasileira” e ao projeto de pesquisa Seabed Map, contribuindo para o mapeamento e a gestão estratégica dos recursos minerais marinhos e terrestres da região.

Figura 1. Mapa do local de estudo.

Fonte: Acervo pessoal do autor (2025)

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido de acordo com o fluxo de atividades da figura 2, na sequência são descritos cada atividade realizada.

Figura 2 : Fluxo SQL

Fonte:Acervo pessoal do autor (2025)

Os dados utilizados foram obtidos diretamente na plataforma SIGMINE (Sistema de Informações Geográficas da Mineração), disponibilizada pela Agência Nacional de Mineração (ANM). A coleta das informações ocorreu no dia 19 de setembro de 2024, assegurando que os resultados refletissem a situação mais atualizada possível dos processos minerários registrados até essa data. Esse recorte temporal é essencial para garantir a consistência das análises, visto que os processos minerários estão em constante atualização devido a novos requerimentos, autorizações ou concessões. Foi realizado carregamento da

camada espacial contendo os dados nacionais de processos minerários no formato shapefile no software ArcGis, ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). Em seguida, aplicou-se o filtro em linguagem Sql por Unidade Federativa (UF), restringindo a visualização apenas aos estados da região Norte e Nordeste do Brasil que fazem parte da Margem Equatorial Brasileira, sendo especificamente: Amapá (AP), Pará (PA), Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE) e Rio Grande do Norte (RN). Após essa filtragem territorial, aplicou-se um segundo filtro baseado na Fase do processo minerário, selecionando apenas aqueles consideradas relevantes para fins desta análise, como Requerimento de Pesquisa, Autorização de Pesquisa, Requerimento de Lavra, Direito de Requerer Lavra e Concessão de Lavra, representando processos em fases iniciais e intermediárias de pesquisa e exploração. A etapa seguinte consistiu na filtragem por Substância Mineral (SUBS), com foco em elementos estratégicos e tecnológicos, tais como cobalto, lítio, grafita, terras raras, nióbio, níquel, tungstênio, silício e tântalo, entre outros. A combinação dos três critérios (UF, FASE e SUBS) resultou em uma seleção que atendeu simultaneamente aos objetivos de localização, estágio do processo e tipo de recurso mineral. Por fim, o conjunto resultante pôde ser exportado como uma nova camada ou ter simbologia de legenda personalizada aplicada, a fim de facilitar a visualização e interpretação dos dados no ambiente de SIG.

Resultados e Discussões

A partir do shapefile do SIGMINE foi possível reconhecer os processos minerários localizados na Margem Equatorial Brasileira terra e mar para as substâncias do critério II, Figura 3, que são: minério de cobalto, minério de cobre, minério de estanho, minério de grafita, minérios do grupo da platina, minério de lítio, minério de nióbio, minério de níquel, minério de silício, minério de tálio, minério de tântalo, minério de terras raras, minério de titânio, minério de tungstênio, minério de urânio e minério de vanádio.

Os resultados também foram analisados em tabelas como a tabela 1 que apresenta a quantidade de substâncias por estados, marinho e terrestre.

Tabela 1

Fonte: SIGMINE

A análise dos dados referentes aos bens minerais com aplicação em produtos e processos de alta tecnologia na região da Margem Equatorial revela uma distribuição heterogênea entre os estados do Amapá (AP), Pará (PA), Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE) e Rio Grande do Norte (RN).

O estado do Pará se destaca de forma expressiva, apresentando os maiores quantitativos em diversos minerais estratégicos, com destaque para o cobre (1.518 ocorrências), níquel (115), estanho (64), e platina (10). O Ceará também se sobressai com importantes quantidades de lítio (470), grafita (66), nióbio (57) e platina (67), indicando potencial relevante para a indústria de alta tecnologia.

O Rio Grande do Norte apresenta concentrações significativas de tântalo (74), tungstênio (34) e lítio (289), enquanto o Piauí mostra-se relevante especialmente para o cobre (547) e o níquel (54). O Amapá e o Maranhão, por sua vez, têm participação mais discreta, com destaque para o tântalo (43 no AP) e terras raras (1 no MA).

É importante ressaltar a presença, ainda que em menor quantidade, de minerais estratégicos como urânio, terras raras e vanádio, com distribuição pontual entre os estados analisados. Essa diversidade mineral evidencia o potencial da Margem Equatorial como área estratégica para o desenvolvimento tecnológico e energético do país. A tabela 2 apresenta a quantidade de processos terrestres.

Tabela 2

Fonte: SIGMINE

A análise dos dados referentes aos títulos minerários relacionados à exploração de minerais em terra na região da Margem Equatorial do Brasil revela um panorama marcadamente ativo, especialmente nos estados do Pará (PA), Ceará (CE) e Piauí (PI).

O Pará é o principal polo de interesse mineral terrestre, registrando 559 requerimentos de pesquisa e 1.068 autorizações de pesquisa — os maiores volumes entre todos os estados analisados. O Ceará também demonstra grande dinamismo, com 252 requerimentos e 661 autorizações de pesquisa, além de registrar 2 concessões de lavra e 148 autorizações formalizadas, o que indica uma transição significativa da fase de prospecção para o desenvolvimento efetivo das minas.

O Piauí mantém posição de destaque, com 129 requerimentos e 471 autorizações de pesquisa, embora ainda não possua títulos na fase de lavra. Já o Rio Grande do Norte (RN) apresenta um perfil intermediário, com 16 requerimentos e 148 autorizações, além de alguns registros de requerimento e concessão de lavra (7 e 4, respectivamente), indicando avanço na cadeia produtiva mineral.

Nos estados do Amapá (AP) e Maranhão (MA), a atividade minerária terrestre ainda se encontra em estágio inicial. O AP registra 33 requerimentos e 22 autorizações de pesquisa, enquanto o MA apresenta apenas 9 registros em cada uma dessas categorias, com apenas 1 concessão de lavra identificada.

De modo geral, a predominância de títulos nas fases iniciais do processo (requerimento e autorização de pesquisa) demonstra um cenário ainda em desenvolvimento, mas com forte potencial para expansão da atividade minerária terrestre na região da Margem Equatorial.

Tabela 3

Fonte: SIGMINE

A análise dos títulos minerários voltados à pesquisa e lavra de minerais em ambiente marinho ao longo da Margem Equatorial brasileira revela um cenário em expansão, com destaque para os estados do Maranhão (MA), Rio Grande do Norte (RN) e Ceará (CE).

O Maranhão lidera em termos de títulos mais avançados, com 65 autorizações de pesquisa e 6 requerimentos de lavra já registrados, além de 6 portarias de lavra, o que demonstra a existência de projetos em estágio mais maduro no contexto da mineração marinha.

O Rio Grande do Norte se destaca com o maior número de autorizações de pesquisa (83), seguido de perto pelo Ceará com 52 autorizações. O RN também possui 2 requerimentos de lavra e um número expressivo de 16 registros de direito de requerer lavra, indicando grande interesse na formalização de atividades de extração marinha.

O estado do Piauí apresenta 15 autorizações e 1 requerimento de pesquisa, ainda em estágio inicial. Já os estados do Pará (PA) e Amapá (AP) não possuem registros significativos de títulos minerários em ambiente marinho, o que pode indicar baixa prospecção ou interesse atual por esses territórios nesse tipo de exploração.

De modo geral, observa-se que, embora os números ainda sejam modestos em comparação ao ambiente terrestre, o interesse pela mineração no mar vem ganhando espaço, especialmente no MA, RN e CE, com avanço de projetos para as fases de lavra — o que pode representar uma importante fronteira de produção futura para o desenvolvimento mineral sustentável na região costeira da Margem Equatorial.

Conclusão

A análise dos processos minerários ao longo da Margem Equatorial Brasileira evidencia um cenário promissor, porém ainda em desenvolvimento, tanto no ambiente terrestre quanto no marinho. A metodologia adotada, baseada em filtros espaciais e temáticos no ambiente SIG, permitiu uma visualização clara da distribuição e do estágio dos títulos minerários associados a minerais estratégicos definidos pelo critério II do Decreto nº 10.657/2021. Entre os principais achados, destaca-se a forte concentração de processos no estado do Pará (PA), especialmente voltados para o minério de cobre e níquel, refletindo o interesse da indústria de alta tecnologia por esses insumos. O Ceará (CE) e o Rio Grande do Norte (RN) também se sobressaem, com quantidades relevantes de lítio, tântalo, tungstênio e grafita, minerais igualmente estratégicos. O RN, em especial, apresenta uma presença significativa tanto em ambiente terrestre quanto marinho, com destaque para 74 processos envolvendo tântalo, 34 de tungstênio e 289 de lítio, além de contar com 83 autorizações de pesquisa no mar e 16 direitos de requerer lavra, configurando-se como um dos estados mais dinâmicos na pesquisa mineral costeira. Observou-se ainda que a mineração na Margem Equatorial é predominantemente exercida em fases iniciais, como requerimentos e autorizações de pesquisa. Em terra, predominam os títulos de autorização de pesquisa, enquanto no mar há um número crescente de autorizações e requerimentos de lavra, com destaque para o Maranhão (MA), que apresenta portarias de lavra e projetos em estágio mais avançado. A existência de diversos processos voltados para substâncias estratégicas como terras raras, urânio, silício e grafita, mesmo que em menor número, aponta para uma diversificação mineral relevante, capaz de contribuir de forma significativa para o avanço tecnológico e a segurança energética do país. Conclui-se que a Margem Equatorial Brasileira abriga um total expressivo de processos minerários, sendo predominante a atuação em terra, mas com expansão evidente da mineração em mar, especialmente no RN, MA e CE. As fases dominantes são aquelas de autorização de pesquisa, refletindo um estágio de prospecção e levantamento ainda inicial, mas com potencial elevado para consolidação futura. Os minerais de maior interesse concentram-se nos setores de tecnologia, energia e indústria de base, com destaque para cobre, lítio, tântalo, tungstênio, níquel e grafita. A continuidade das pesquisas e a integração com programas como o Seabed Map e o Pró-Minerais Estratégicos será essencial para o desenvolvimento sustentável da mineração na região, respeitando os princípios de governança, inovação e aproveitamento racional dos recursos naturais marinhos e costeiros do Brasil.

Referências

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021. Estabelece a relação de minerais estratégicos para o Brasil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 jun. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-2-de-18-de-junho-de-2021-327352416>. Acesso em: 22 jul. 2025. BRASIL. Presidência da República. Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. Institui o Programa Pró-Minerais Estratégicos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 25 mar. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Decreto/D10657.htm. Acesso em: 22 jul. 2025. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). ArcGIS Web Application – Geoportal SIGMINE. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908>. Acesso em: 22 jul. 2025. GEOAPLICADA. Limites dos países da América do Sul – Dados espaciais. Disponível em: <https://www.geoaplicada.com/dados/limites-paises-america-do-sul/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

Anexos

Mapa do local de estudo.

Fluxo SQL

Minerais criticos margem equatorial

Tabela 1

Tabela 2

Tabela 3

CÓDIGO: ET0478

AUTOR: ALLEX THIERRY DE PAULA LIMA BARBOSA

ORIENTADOR: EFRAIN PANTALEON MATAMOROS

TÍTULO: Fabricar uma bancada usando laser comerciais e fendas para reproduzir o fenômeno de interferência

Resumo

O experimento da dupla fenda, realizado por Thomas Young no início do século XIX, constituiu um marco na física por demonstrar claramente o comportamento ondulatório da luz. O objetivo deste trabalho foi reproduzir essa experiência clássica para observar e analisar o padrão de interferência formado pela luz ao passar por duas fendas estreitas e paralelas. Utilizando uma fonte de luz verde, fendas de largura conhecida e uma tela de observação, foi possível medir a posição das franjas claras e escuras, permitindo comparar os resultados experimentais com os previstos teoricamente. Os dados obtidos mostraram a formação de um padrão de interferência regular, confirmando a relação entre a distância das fendas, o comprimento de onda da luz e a separação das franjas.

Palavras-chave: Interferência da luz; Dupla Fenda; Fenda simples.

Palavras-chave: Palavras-chave: Interferência da luz; Dupla Fenda; Fenda simples.

TITLE: Build an experimental setup using commercial lasers and slits to reproduce the interference phenomenon

Abstract

The double-slit experiment, carried out by Thomas Young in the early 19th century, was a milestone in physics as it clearly demonstrated the wave-like behavior of light. The objective of this work was to reproduce this classical experiment in order to observe and analyze the interference pattern formed when light passes through two narrow and parallel slits. Using a green light source, slits of known width, and a projection screen, it was possible to measure the position of bright and dark fringes, allowing a comparison between the experimental results and the theoretical predictions. The data obtained showed the formation of a regular interference pattern, confirming the relationship between the slit separation, the wavelength of light, and the fringe spacing.

Keywords: Light interference; Double slit; Single slit.

Keywords: Light interference; Double slit; Single slit.

Introdução

A proposta da pesquisa é a elaboração de uma bancada experimental para o estudo da difração e da interferência da luz, em que foi fundamentado no experimento de dupla fenda de Thomas Young. O trabalho busca reproduzir e analisar esse fenômeno de forma prática, e aproximar a teoria, experimento e permitir uma compreensão mais acessível e didática dos princípios ópticos envolvidos. O conteúdo é apresentado com ênfase no contexto histórico do desenvolvimento do experimento de Young, destacando sua relevância para o entendimento da natureza ondulatória da luz. Além disso, a interferência é abordada de forma mais ampla, sendo demonstrada também para ondas mecânicas e sonoras. Atualmente, a óptica é representada de maneira predominantemente teórica, por meio de diagramas, esquemas e até mesmo simulações. Na maioria dos casos, os alunos não obtêm o acesso a experimentação prática, visto que, os equipamentos necessários para a reprodução do fenômeno de interferência em fenda dupla são caros e de difícil acesso, tornando isso restrito a visualização qualitativa do fenômeno. Diante disso, é relevante propor alternativas que possibilitem a experimentação prática acessível, permitindo não apenas a observação da interferência, mas também a realização de medições quantitativas. Dessa forma, o projeto busca oferecer um recurso inovador, de baixo custo e fácil reprodução, capaz de enriquecer a compreensão dos fenômenos ópticos.

Este trabalho foi desenvolvido durante o programa de iniciação científica no URA, laboratório da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), onde são realizadas pesquisas contínuas de diversas áreas. Nesse período, foi possível ter contato direto com a experimentação prática, a manipulação de equipamentos, o uso de instrumentos de medida e a resolução de problemas experimentais. A proposta consistiu na construção de uma bancada experimental utilizando lasers comerciais verdes ou vermelhos e fendas, que possibilitam não apenas a visualização clara do fenômeno de interferência da luz, mas também a coleta de dados para análises quantitativas. Assim, além de promover a aproximação entre teoria e prática, essa iniciativa contribui para democratizar o acesso a experimentos fundamentais no ensino de óptica.

Os experimentos de interferência da luz desempenham um papel central no avanço da ciência e da tecnologia. Eles vão constituir uma base de importantes aplicações, como a óptica aplicada no desenvolvimento de instrumentos modernos, e tira como exemplo os interferômetros utilizados em pesquisas astronômicas e na detecção de ondas gravitacionais. Para compreender o fenômeno da interferência, não se limita a uma curiosidade acadêmica, mas representa um fundamento essencial para inovações científicas em diversas áreas de conhecimento. Além do aspecto científico, este trabalho contribuiu de forma significativa para a formação acadêmica. Teve a oportunidade de juntar teoria e prática, em que proporcionou o contato direto com procedimentos experimentais que exigem análise crítica, precisão em medições e interpretação de resultados. Essa vivência foi fundamental para consolidar conhecimentos de óptica e, ao mesmo tempo, desenvolver competências científicas relevantes para futuras pesquisas.

Metodologia

O projeto foi desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), no laboratório do URA, localizado no departamento da Escola de Ciências e Tecnologia (ECT). Para a construção da bancada experimental, foram utilizados equipamentos disponíveis no

laboratório, em especial lasers comerciais e fendas, que constituíram os principais elementos para a reprodução do fenômeno da bancada de interferência.

Além disso, foram aproveitados também equipamentos subutilizados, que não estavam mais em bom funcionamento, mas puderam ser adaptados e reutilizados na montagem, como multímetros, potenciômetros e fontes de notebooks. A dupla fenda foi feita a partir de um pente de pentear bem fino, cujo espaçamento regular entre os dentes (aproximadamente 1 mm) o que possibilitou simular fendas estreitas e paralelas, funcionando como elemento difrator, em que foi capaz de gerar o padrão de interferência que era esperado. Para a realização das medições, o laser foi posicionado a cerca de 1 cm do pente, e o anteparo (papel ou parede) colocado a uma distância de aproximadamente 83 cm do sistema.

Após a montagem, o sistema foi testado para garantir a nitidez do padrão interferométrico. Foram feitas observações diretas e medições quantitativas da distância entre as franjas de interferência. Considerando a distância entre a fenda e o anteparo ($L \approx 83$ cm) e o espaçamento entre os dentes do pente que simulou as fendas ($d \approx 1$ mm), o valor teórico previsto para a separação entre franjas é de aproximadamente 0,44 mm para um laser verde ($\lambda \approx 532$ nm) ou 0,54 mm para um laser vermelho ($\lambda \approx 650$ nm). As medidas obtidas experimentalmente se mostraram compatíveis com essas previsões, confirmando a sua contabilidade.

Resultados e Discussões

A montagem realizada possibilitou a observação nítida do padrão de interferência, projetado tanto em anteparo de papel quanto em parede. As franjas claras e escuras apresentaram distribuição regular, evidenciando a coerência da luz emitida pelo laser e a adequação do espaçamento entre as fendas formadas pelos dentes do pente. Esse resultado confirma que, mesmo com materiais simples e de baixo custo, é possível reproduzir o fenômeno descrito por Thomas Young, ainda que, no presente caso, o arranjo se aproxime de uma rede de difração em função do grande número de fendas.

As medições realizadas diretamente sobre o padrão de franjas indicaram valores próximos de meio milímetro entre máximos consecutivos, em concordância com as previsões teóricas. Considerando a distância entre o sistema e o anteparo (83 cm), bem como o espaçamento aproximado de 1 mm entre os dentes do pente, o cálculo teórico prevê uma separação média de 0,44 mm para laser verde. As medidas experimentais se mantiveram dentro dessa faixa, com pequenas variações que podem ser atribuídas à dificuldade de determinar com exatidão o posicionamento do laser, a distância até o anteparo e o espaçamento real do pente utilizado.

Conclusão

Os resultados obtidos neste experimento confirmaram o padrão de interferência previsto teoricamente por Thomas Young, evidenciando o comportamento ondulatório da luz. As medições realizadas das franjas claras e escuras apresentaram boa concordância com os valores calculados a partir das equações de interferência, demonstrando que a separação das franjas depende diretamente da distância entre as fendas e do comprimento de onda da luz utilizada. Pequenas discrepâncias observadas entre os valores teóricos e experimentais podem ser atribuídas a limitações na precisão do alinhamento do equipamento e na medição das franjas, sugerindo que ajustes adicionais poderiam aprimorar a exatidão dos resultados. De

forma geral, o projeto proporcionou uma compreensão sólida dos princípios da óptica e da propagação ondulatória da luz, em que consolidou os conceitos fundamentais da física moderna.

A atividade também evidenciou a relevância do método científico, desde a formulação de hipóteses até a análise crítica dos resultados, incentivando a reflexão sobre a precisão experimental e a interpretação de dados. Por fim, o estudo da dupla fenda demonstra não apenas a natureza ondulatória da luz, mas também serve como base para investigações mais avançadas em física quântica, mostrando como experimentos clássicos continuam a contribuir para a educação científica e para o desenvolvimento de conhecimentos fundamentais na área de física.

Referências

ANDRADE, F. B.; SILVA, T. R. O. L. Difração a laser como proposta de experimento para o Ensino de Física. In: XXII Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2017.

Anais... UEPB, 2017. ANDRADE, J. A. N. de; LOPES, N. C.; CARVALHO, W. L. P. Uma análise crítica do Laboratório Didático de Física: a experimentação como uma ferramenta para a cultura científica. In: Encontro Nacional de pesquisa em ensino de ciências, 2009. Anais... Florianópolis, 2009.

ARAÚJO, M.; ABIB, M. Atividades Experimentais no Ensino de Física: Diferentes Enfoques, Diferentes Finalidades. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 25, n. 2, jun. 2003.

AULER, D. Alfabetização científico-tecnológica: um novo "paradigma"? Ensaio pesquisa em educação em ciências, v. 5, n. 1, 2003.

BARDIN, L. Análise de conteúdo. Edições 70, LDA. Lisboa, Portugal, 1977.

BARRETO FILHO, B.; SILVA, C. X. Física aula por aula. FTD, v. 2, 2018.

BENKERT, T.; FRANKE, K.; STANDISH, R. SciDAVis, 2007. Disponível em: ; Acesso em: 29 agosto de 2025.

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Curricular Comum (BNCC). Brasília: MEC, 2017.

BRASIL. Parâmetros curriculares nacionais (PCN). Brasília: MEC, 1998.

BRASIL. Parâmetros curriculares nacionais (PCN+). Ciências da natureza e suas tecnologias. Brasília: MEC, 2002.

BRYSON, B. Breve História de Quase Tudo. Companhia das Letras; 1ª Edição, 2005.

DARROZ, L. M. D.; ROSA, C. T. W.; ROSA, A. B. Experimentos simples para visualização dos fenômenos de difração e interferência da luz. Revista Tema, v. 13, p. 18-26, 2016.

DOUBLE-SLIT INTERFERENCE WITH A CALIPER. Disponível em: 29 agosto de 2025.
51

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SAND

Anexos

Figura 01 - Padrão de interferência obtido no experimento de dupla fenda

Figura 02 - Padrão de interferência obtido no experimento de dupla fenda (menor
intensidade)

CÓDIGO: ET0483

AUTOR: IWRI SIMPLÍCIO FELIPE

ORIENTADOR: HELTON MAIA PEIXOTO

TÍTULO: Tomada de Decisões em Sistemas Colaborativos de Drones e Carros Robóticos com Inteligência Artificial

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema colaborativo entre drones e veículos terrestres para detecção de objetos em tempo real utilizando inteligência artificial e visão computacional. Foi criado um dataset com imagens de bolinhas vermelhas capturadas por câmera de celular em diferentes condições de iluminação, ângulos e distâncias, organizado e rotulado com Roboflow.

O modelo YOLOv11 foi treinado com diferentes otimizadores (Auto, AdamW, RAdam e NAdam) e avaliado por métricas de desempenho, como mAP, precisão, recall, tempo de treinamento e inferência. O otimizador Auto apresentou melhor equilíbrio entre acurácia e eficiência, atingindo mAP@0.5 de 0.7613, precisão de 0.8186 e recall de 0.7093, com tempo médio de inferência de 150 ms por imagem.

Técnicas de pré-processamento com OpenCV e Matplotlib otimizaram a segmentação, e uma interface interativa com Streamlit permitiu visualizar imagens e métricas. A análise visual mostrou boa correspondência entre objetos detectados e alvos reais, confirmando a eficácia do sistema.

Os resultados indicam que é viável implementar soluções embarcadas de baixo custo para aplicações como mapeamento agrícola, navegação autônoma e operações de busca e resgate, oferecendo base para futuras colaborações entre veículos aéreos e terrestres.

Palavras-chave: Visão Computacional, YOLOv11, Veículos Autônomos, Detecção de Objetos.

TITLE: Decision Making in Collaborative Systems of Drones and Robotic Cars with Artificial Intelligence

Abstract

This paper presents the development of a collaborative system between drones and ground vehicles for real-time object detection using artificial intelligence and computer vision. A

dataset was created with images of red dots captured by a smartphone camera under different lighting conditions, angles, and distances, organized and labeled using Roboflow.

The YOLOv11 model was trained with different optimizers (Auto, AdamW, RAdam, and NAdam) and evaluated using performance metrics such as mAP, precision, recall, training time, and inference time. The Auto optimizer presented the best balance between accuracy and efficiency, achieving an mAP@0.5 of 0.7613, a precision of 0.8186, and a recall of 0.7093, with an average inference time of 150 ms per image.

Preprocessing techniques with OpenCV and Matplotlib optimized segmentation, and an interactive interface with Streamlit allowed visualization of images and metrics. Visual analysis showed good correspondence between detected objects and real targets, confirming the system's effectiveness.

The results indicate that it is feasible to implement low-cost embedded solutions for applications such as agricultural mapping, autonomous navigation, and search and rescue operations, providing a basis for future collaborations between aerial and ground vehicles.

Keywords: Computer Vision, YOLOv11, Autonomous Vehicles, Object Detection.

Introdução

A integração entre veículos autônomos terrestres e aéreos representa um avanço significativo no desenvolvimento de sistemas inteligentes capazes de operar de forma colaborativa em diferentes tipos de ambientes. Para que essa cooperação seja eficiente, é essencial que os agentes envolvidos como drones e carros robóticos sejam capazes de perceber o ambiente, interpretar informações visuais e tomar decisões autônomas em tempo real. Nesse contexto, técnicas de visão computacional e inteligência artificial (IA) desempenham um papel fundamental (YAZGAN; AKKANAPRAGADA; ZÖLLNER, 2024).

Nesse contexto, o presente trabalho busca explorar a tomada de decisões em sistemas colaborativos de drones e carros robóticos com inteligência artificial, com foco na utilização de visão computacional para detecção de objetos relevantes no ambiente. Para isso, foi construído um dataset próprio com imagens capturadas por câmera de celular, contendo bolinhas vermelhas como objetos de interesse. As imagens foram organizadas e rotuladas com o auxílio da plataforma Roboflow, considerando práticas que evitam problemas como underfitting e overfitting durante o treinamento. O modelo resultante foi posteriormente testado em tempo real utilizando uma ESP32-CAM, responsável pela captura e envio das imagens em um sistema embarcado para inferência local.

Na etapa de detecção, foi empregado o modelo YOLOv11, onde diferentes estratégias de otimização por gradiente foram testadas. Além disso, foram estudadas métricas como precisão, recall, acurácia, perda e matriz de confusão, visando a compreensão aprofundada do desempenho do modelo em tarefas de detecção e segmentação. Técnicas de pré-processamento de imagem também foram aplicadas com o objetivo de reduzir ruídos, otimizar a performance do YOLO e melhorar a análise visual, utilizando bibliotecas como OpenCV, Pillow e Matplotlib. Por fim, foi desenvolvido um painel interativo com Streamlit,

permitindo visualizar os resultados dos modelos de forma acessível. Essa etapa contribuiu para a análise qualitativa e quantitativa das decisões tomadas pelos sistemas embarcados, além de demonstrar os limites atuais de renderização em tempo real dessa ferramenta.

Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho foi estruturado em quatro etapas principais: aquisição de imagens, construção e treinamento do modelo de detecção, pré-processamento e otimização, e desenvolvimento de uma interface de visualização. Essas etapas estão representadas de forma esquemática na Figura 1.

1. Aquisição e Processamento Inicial das Imagens

Para a construção do dataset, foram capturadas imagens utilizando uma câmera de celular em ambientes controlados, contendo bolinhas vermelhas como objetos-alvo, conforme ilustrado na Figura 2. As fotografias foram feitas com variações de ângulos, distâncias e condições de iluminação, visando aumentar a robustez do modelo. Em seguida, as imagens foram organizadas e rotuladas por meio da plataforma Roboflow, que possibilitou a criação automática dos conjuntos de treinamento, validação e teste.

A ESP32-CAM foi utilizada em uma etapa posterior, apenas para testes de detecção em tempo real com o modelo treinado. Esse microcontrolador com câmera integrada foi conectado a um sistema embarcado para capturar imagens ao vivo e alimentar o pipeline de inferência do YOLOv11.

2. Construção e Treinamento do Modelo de Detecção

O dataset gerado foi dividido em subconjuntos de treinamento, validação e teste. Utilizou-se o modelo YOLOv11, uma arquitetura moderna para detecção de objetos em tempo real, compatível com tarefas de segmentação e reconhecimento (KHANAM; HUSSAIN, 2024). Diversos experimentos foram conduzidos utilizando diferentes otimizadores de gradiente (como AdamW, RAdam, NAdam, Auto), de forma a avaliar os impactos no desempenho do modelo.

Durante o treinamento, foram monitoradas métricas como acurácia, perda, precisão, recall e matriz de confusão, a fim de identificar situações de underfitting e overfitting, bem como ajustar os hiperparâmetros.

3. Pré-processamento e Otimização de Imagens

Para melhorar o desempenho do modelo YOLO em tempo de inferência, foram aplicadas técnicas de pré-processamento de imagem com uso das bibliotecas OpenCV e Matplotlib. Essas técnicas incluíram conversão de cores, redimensionamento, suavização e aplicação de máscaras de cor para destaque de objetos vermelhos. Foi verificado o impacto dessas técnicas na velocidade de detecção e na qualidade da segmentação.

4. Desenvolvimento da Interface Interativa

Para visualização dos resultados e amostragem dos dados processados, foi criada uma interface com a biblioteca Streamlit (figura 3), permitindo o carregamento de imagens, exibição das detecções feitas pelo modelo YOLO, além da apresentação de gráficos e

métricas de desempenho. Essa interface serviu como painel de análise interativa, embora tenha sido observada limitação da biblioteca para renderização em tempo real com múltiplas imagens ou vídeos.

Resultados e Discussões

A partir do treinamento de diferentes versões do modelo YOLOv11, avaliou-se o desempenho com foco em métricas quantitativas relevantes: mean Average Precision (mAP) nas variantes @0.5 e @0.5:0.95, precisão, recall, tempo de treinamento e tempo médio de inferência por imagem. Cada experimento foi conduzido com um otimizador de gradiente distinto, permitindo analisar sua influência sobre a qualidade da segmentação e a viabilidade de aplicação em tempo real.

O melhor desempenho geral foi observado com o otimizador padrão da Ultralytics, que apresentou mAP@0.5 de 0.7613 e mAP@0.5:0.95 de 0.5438, mantendo valores elevados também para precisão (0.8186) e recall (0.7093). Esses resultados foram alcançados em um tempo total de treinamento de aproximadamente 4.98 horas, evidenciando um bom equilíbrio entre acurácia e eficiência computacional.

Com o otimizador AdamW, obteve-se um tempo de treinamento significativamente menor (3.48 horas), com desempenho ainda satisfatório: mAP@0.5 de 0.7336, mAP@0.5:0.95 de 0.5122, precisão de 0.7086 e recall de 0.6725. Isso sugere que AdamW pode ser vantajoso em contextos com restrição de tempo ou recursos, apesar de não atingir os melhores índices de acurácia.

O RAdam demonstrou estabilidade e resultados consistentes, com mAP@0.5 de 0.7391 e mAP@0.5:0.95 de 0.5265, além de precisão e recall superiores a 0.79 e 0.68, respectivamente. Embora tenha requerido mais tempo de treinamento (7.62 horas), o comportamento do modelo durante o processo foi linear e confiável.

Por outro lado, o uso do NAdam resultou nos menores índices de desempenho entre os experimentos. Apesar do mesmo tempo de treinamento do RAdam (7.62 horas), o modelo apresentou mAP@0.5:0.95 de apenas 0.4958, precisão de 0.6974 e recall de 0.6441. Tais valores indicam possível sobreajuste ou dificuldade na convergência do modelo com essa configuração específica.

Em termos de velocidade de inferência, os testes demonstraram que a versão treinada com otimizador Auto foi capaz de realizar previsões com média de 150 ms por imagem, atingindo mínima de 125.92 ms e máxima de 158.77 ms, com desvio padrão de 7.17 ms. Esses resultados demonstram que o sistema pode operar em tempo real, mesmo em dispositivos embarcados.

Por fim, uma análise visual complementar, feita a partir de imagens capturadas e segmentadas, demonstrou a capacidade do modelo em identificar corretamente as bolinhas vermelhas em diferentes contextos de iluminação e posicionamento. A comparação entre a segmentação manual e as previsões revelou boa sobreposição entre os objetos detectados e os alvos reais, confirmando a eficácia da arquitetura treinada.

Dessa forma, os dados obtidos sustentam a escolha do otimizador padrão do YOLOv11 como a alternativa mais eficaz para aplicações embarcadas de detecção visual em tempo real. A

combinação entre desempenho, estabilidade e tempo de resposta favorece seu uso em sistemas autônomos colaborativos com drones e veículos terrestres.

Conclusão

Este trabalho demonstrou a viabilidade de aplicar o modelo YOLOv11 em um sistema embarcado para detecção de objetos em tempo real, com foco na colaboração entre drones e veículos terrestres. Mesmo utilizando um dataset reduzido, foi possível alcançar resultados satisfatórios em métricas como mAP, precisão e recall, além de tempos de inferência compatíveis com aplicações práticas em dispositivos de baixo custo, como a ESP32-CAM.

Os experimentos evidenciaram que o otimizador automático integrado ao YOLOv11 apresentou o melhor equilíbrio entre acurácia, estabilidade e eficiência computacional, superando outras estratégias de ajuste de gradiente. Além disso, as análises visuais confirmaram a capacidade do modelo em segmentar corretamente os objetos de interesse, mesmo sob condições variadas de iluminação e posicionamento, reforçando seu potencial em cenários reais.

Apesar dos avanços obtidos, o estudo ainda apresenta limitações, como o tamanho do conjunto de dados e o número restrito de arquiteturas testadas. Nesse sentido, os próximos passos incluem a ampliação e diversificação do dataset, a experimentação com outras variantes de YOLO e arquiteturas alternativas.

Assim, este trabalho representa um passo inicial no desenvolvimento de sistemas inteligentes de detecção e tomada de decisão, contribuindo para aplicações futuras em mapeamento e navegação autônoma.

Referências

KHANAM, Rahima; HUSSAIN, Muhammad. YOLOv11: an overview of the key architectural enhancements. Huddersfield: Huddersfield University, 2024.

YAZGAN, Melih; AKKANAPRAGADA, Mythra Varun; ZÖLLNER, J. Marius. Collaborative Perception Datasets in Autonomous Driving: A Survey. arXiv preprint arXiv:2404.14022, 22 abr. 2024.

Anexos

Figura 1 – Fluxo de desenvolvimento do sistema proposto

Figura 2 – Exemplos de imagens do dataset com bolinhas vermelhas em diferentes condições

Figura 3 – Interface Streamlit

CÓDIGO: ET0542

AUTOR: JOAO VICTOR DE OLIVEIRA SANTOS

ORIENTADOR: HELTON MAIA PEIXOTO

TÍTULO: Navegação Autônoma de Drones através de Visão Computacional e Aprendizado de Máquina

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de navegação autônoma para drones, baseado em técnicas de visão computacional e aprendizado de máquina para interpretação de imagens aéreas. Tem-se por objetivo desenvolver algoritmos de ponta capazes de mapear rotas e tomar decisões autônomas que possibilitem uma navegação segura e eficiente, associadas às atuais tendências de automação e inteligência artificial.

Palavras-chave: Drone, Visão Computacional, YOLOv11, Machine Learning, Redes Neurais.

TITLE: Autonomous Drone Navigation through Computer Vision and Machine Learning

Abstract

This article presents the development of an autonomous navigation system for drones, based on computer vision and machine learning techniques for interpreting aerial images. The objective is to develop cutting-edge algorithms capable of mapping routes and making autonomous decisions that enable safe and efficient navigation, aligned with current trends in automation and artificial intelligence.

Keywords: Computer Vision, Drone, YOLOv11, Machine Learning, Neural Networks.

Introdução

O avanço das tecnologias de automação e inteligência artificial tem impulsionado o desenvolvimento de soluções cada vez mais sofisticadas em diversas áreas do conhecimento. Entre essas inovações, temos a crescente popularidade dos veículos aéreos não tripulados (VANTs), conhecidos como drones, expandindo assim as suas possibilidades de aplicações como logística, inspeção de infraestrutura e resgate. A crescente demanda por esses sistemas capazes de operar de forma autônoma, evidencia a necessidade de estudos voltados para esse tipo de navegação, visando uma maior eficácia e segurança.

Nesse caso, a integração de técnicas de visão computacional e aprendizado de máquina emerge como uma alternativa promissora para a interpretação de imagens aéreas e tomada de decisão em tempo real. Essas perspectivas permitem que sejam capazes de reconhecer padrões, identificar e traçar rotas de forma inteligente.

O presente projeto busca explorar essas tecnologias no desenvolvimento de um sistema de navegação autônoma para drones, com destaque para o mapeamento de rotas e detecção de estradas. Ao integrar algoritmos de visão computacional e aprendizado de máquina, pretende-se demonstrar a capacidade de um modelo de aprender e adaptar-se a diferentes cenários.

Metodologia

Para a execução desse projeto foi desenvolvido um ambiente controlado, simulando cenários reais de uso. A criação desse ambiente surgiu a partir do treinamento de diversas imagens aéreas que passaram por um processo de segmentação, as imagens usadas foram obtidas por meio da plataforma Google Maps (Google, 2025). O desenvolvimento do sistema de treinamento foi realizado com o uso das linguagens de programação Python e C++, em combinação com o GitHub para o gerenciamento do código. As bibliotecas OpenCV (BRADSKI; KAEHLER, 2008), TensorFlow (ABADI et al., 2016) e Pytorch juntamente das ferramentas Google Colab (Google, 2025) e RoboFlow (DWYER et al., 2025) constituíram a base da rede neural, com o processamento das imagens e o treinamento.

O presente trabalho está interligado por diferentes etapas. Primeiramente foi realizada a coleta das imagens em ambientes externos (Figura 1), aproximadamente 1700 imagens (Tabela 1), seguida do pré-processamento com técnicas de ajustes, normalização e filtro, em conjunto da segmentação de estradas, como pode ser visto na figura 2. Logo após, é aplicado o algoritmo de detecção de estradas criado com apoio do YOLOv11 (Figura 3) (REDMON; FARHADI, 2016), usando também a técnica de transição de aprendizado com intuito de ajustar os modelos pré-treinados. Após todo esse processo, será feita uma integração para unir a captura, processamento, treinamento e mecanismo para tomada de decisão, permitindo a execução da navegação autônoma

Resultados e Discussões

Para a construção da rede neural voltada ao reconhecimento de estradas em imagens aéreas, utilizou-se uma GPU NVIDIA Tesla T4 disponibilizada pela plataforma Google Colaboratory (Google, 2025), a fim de auxiliar no processo de treinamento. A partir de testes realizados, foram escolhidas 100 épocas para o treinamento, que totalizaram aproximadamente 6 horas e 30 minutos de processamento.

Na figura 4 são apresentados os gráficos da Média de Precisão Média (mAP) ao decorrer das épocas, apresentando uma estabilidade de desempenho com valores superiores a 80,0% para a localização de estradas na imagem (Box) e a segmentação das mesmas (Mask). Esses resultados sugerem que a rede conseguiu aprender de maneira consistente as principais características das estradas.

Após o treinamento, o modelo é submetido a um teste automático, esse estágio nos gera uma matriz de confusão (Figura 5), onde a sua diagonal principal é a quantidade de acertos do modelo e o restante representam erros. A partir dessa análise, verificou-se que a rede obteve resultados satisfatórios com 73,0% de acertos para identificação de estradas, enquanto 27,0% foi confundido com a classe “background”.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram a viabilidade do uso de redes neurais convolucionais para a detecção de estradas (localização) em imagens aéreas. Portanto, também indicam a necessidade do aperfeiçoamento em etapas específicas, como aumento da base de dados, técnicas de refinamento e balanceamento de classes, a fim de reduzir os falsos negativos e melhorar a capacidade de generalização do modelo .

Conclusão

O desenvolvimento do sistema de navegação autônoma para drones, baseado na integração de visão computacional e aprendizado de máquina, demonstraram resultados positivos no reconhecimento e na detecção de estradas em imagens aéreas. O modelo apresentou níveis de precisão consideráveis, confirmando assim a viabilidade do uso de redes neurais.

Apesar dos resultados obtidos, ainda foram identificados desafios, como a necessidade de amplificar a base de dados, adotar métodos de refinamento e técnicas de balanceamento. Essas melhorias poderão aumentar a capacidade de generalização do modelo e torná-lo mais robusto.

De forma geral, este trabalho contribuirá para pesquisas futuras que busquem novas arquiteturas de redes neurais, sendo assim um passo importante para a consolidação de soluções tecnológicas que ampliem a autonomia e efetividade desses dispositivos.

Referências

GOOGLE. Google Colaboratory. Disponível em: <https://colab.research.google.com/>. Acesso em: 15 maio 2025.

DWYER, B.; NELSON, J.; HANSEN, T. et al. Roboflow (Version 1.0) [Software]. Disponível em: <https://roboflow.com>. Acesso em: 10 junho 2025.

GOOGLE. Google Maps. Disponível em: <https://maps.google.com/>. Acesso em: 02 abril 2025.

BRADSKI, Gary; KAEHLER, Adrian. Learning OpenCv: computer vision with the OpenCv library. Sebastopol: O'Reilly Media, 2008.

ABADI, M. et al. TensorFlow: a system for large-scale machine learning. In: USENIX SYMPOSIUM ON OPERATING SYSTEMS DESIGN AND IMPLEMENTATION (OSDI), 12., 2016. Proceedings [...]. [S.l.]: USENIX Association, 2016. p. 265-283.

REDMON, J.; FARHADI, A. YOLO: real-time object detection. arXiv preprint, arXiv:1612.08242, 2016. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1612.08242>. Acesso em: 20 fev. 2025.

Anexos

Figura 01 - Imagem Original

Figura 02 - Imagem Pré-Processada e Segmentada

Figura 03 - Imagens após o treinamento

Tabela 1 - Separação da Dataset

Figura 4 - Resultados mAP50

Figura 5 - Matriz de Confusão

CÓDIGO: ET0556

AUTOR: EZEQUIEL AMADOR SOARES JUNIOR

COAUTOR: JOÃO VICTOR FERREIRA LACERDA AIRES

ORIENTADOR: LEONARDO ANDRADE DE ALMEIDA

TÍTULO: Comparando Distâncias de Cefeidas: Gaia DR3 e Infravermelho Médio

Resumo

As Cefeidas Clássicas são estrelas pulsantes cuja relação entre período e luminosidade as torna ferramentas fundamentais para calibração das supernovas do tipo 1A em baixos redshifts e consequentemente para a determinação de distâncias em escalas cósmicas. Neste contexto, este trabalho investiga a consistência entre as distâncias das Cefeidas derivadas via paralaxes do Gaia DR3 e aquelas obtidas através da relação período-luminosidade no infravermelho, utilizando dados dos satélites WISE e Spitzer. Partindo de uma amostra inicial de 1.589 Cefeidas e aplicando um refinamento usando critérios de qualidade nas medidas chegamos a uma amostra final de 245 estrelas. Nossa análise revela que, embora a maioria das Cefeidas apresente concordância entre os dois métodos, existem discrepâncias sistemáticas, particularmente para estrelas com distâncias maiores. O ajuste via Monte Carlo com Cadeia de Markov indica um desvio significativo dos coeficientes angular e linear em relação aos esperados. Esses valores reforçam a hipótese de que variáveis adicionais, como a metalicidade, extinção residual ou idade, que não são consideradas na calibração tradicional da relação período-luminosidade das Cefeidas, podem estar influenciando as medidas realizadas. Os resultados destacam a importância de se considerar essas variações sistemáticas para refinar a relação de calibração das Cefeidas, a qual é essencial para a compreensão da escala de distâncias do Universo.

Palavras-chave: Cefeidas. Distâncias astrofísicas. Relação Período-Luminosidade. Gaia.

TITLE: A Comparison of Cepheid Distances: Gaia DR3 vs. the Mid-Infrared

Abstract

Classical Cepheids are pulsating stars whose period-luminosity relationship makes them fundamental tools for calibrating Type Ia supernovae at low redshifts and, consequently, for determining distances on cosmic scales. In this context, this study investigates the consistency between Cepheid distances derived from Gaia DR3 parallaxes and those obtained through the period-luminosity relationship in the infrared, using data from the WISE and Spitzer satellites. Starting with an initial sample of 1,589 Cepheids and applying a refinement using quality criteria for the measurements, we arrived at a final sample of 245 stars. Our analysis reveals that, while most Cepheids show agreement between the two methods, there are systematic discrepancies, particularly for stars at greater distances. The Monte Carlo Markov Chain fit indicates a significant deviation of the angular and linear coefficients from the expected values. These values reinforce the hypothesis that additional variables, such as metallicity, residual extinction, or age, which are not considered in the traditional calibration

of the Cepheid period-luminosity relationship, may be influencing the measurements. The results highlight the importance of considering these systematic variations to refine the Cepheid calibration relationship, which is essential for understanding the Universe's distance scale.

Keywords: Cepheids. Astrophysical distances. Period–Luminosity relation. Gaia.

Introdução

As estrelas Cefeidas representam uma classe de objetos de extrema importância para a Astrofísica. Caracterizadas como estrelas variáveis pulsantes, sua principal relevância reside na relação período-luminosidade (P-L), descoberta por Henrietta Swan Leavitt no início do século XX [1]. Essa relação estabelece que a luminosidade intrínseca de uma Cefeida é diretamente proporcional ao seu período de variação de brilho, o que as consagra como "velas padrão" para a medição de distâncias cósmicas com notável precisão.

A capacidade de determinar distâncias de forma acurada confere às Cefeidas um papel central na construção da escada de distâncias cósmicas, um pilar que permite aos astrônomos medir a escala do Universo. Historicamente, essa propriedade foi fundamental para a descoberta da expansão do Universo por Edwin Hubble e para a formulação da Lei de Hubble [2]. Atualmente, medições precisas baseadas em Cefeidas são essenciais para calibrar outros indicadores de distância, como as supernovas do tipo Ia, e, consequentemente, para refinar o valor da constante de Hubble (H_0), que descreve a taxa de expansão do Universo [3].

Além de sua aplicação em Cosmologia, o estudo das Cefeidas fornece informações valiosas sobre a evolução estelar e a física interna das estrelas, contribuindo para uma compreensão mais profunda dos mecanismos que impulsionam suas pulsações [4]. Elas também são ferramentas eficazes no mapeamento estrutural da Via Láctea e de galáxias próximas, revelando detalhes sobre morfologia galáctica e a história da formação estelar [5].

Nesse contexto, a análise e interpretação dos dados observacionais complexos associados às Cefeidas demandam uma abordagem metodológica robusta. É aqui que a Astroestatística, a interseção entre Astronomia e Estatística, desempenha um papel indispensável. A aplicação de técnicas estatísticas avançadas é crucial para a calibração da relação P-L, a estimativa rigorosa de distâncias, a correção de vieses observacionais e a quantificação precisa das incertezas.

Modelos de regressão e modelos hierárquicos, por exemplo, são empregados para ajustar a relação P-L e propagar as incertezas de maneira consistente. Dessa forma, a Astroestatística não apenas viabiliza a análise de grandes volumes de dados, mas também eleva a precisão das medições cosmológicas, sendo um componente chave para o avanço do nosso entendimento sobre o cosmos.

Neste trabalho, propomos verificar se as distâncias estimadas para um conjunto de Cefeidas a partir da relação P-L e que foram publicadas no catálogo de Skowron et al. (2019) concordam com as medidas de paralaxes destes mesmos objetos realizadas pelo Gaia Data Release 3 (DR3) [6]. Este será um teste fundamental da relação P-L da Cefeidas, uma vez que as medidas realizadas pelo Gaia é o que temos de mais preciso para determinação de distâncias em escala Galáctica.

Metodologia

A metodologia deste trabalho se baseia em uma análise comparativa e estatística de distâncias para Cefeidas Clássicas, confrontando as medições de paralaxe geométrica com as distâncias inferidas a partir da relação período-luminosidade (P-L) no infravermelho. Para isso, os dados foram extraídos de duas fontes primárias: o catálogo de paralaxes do Gaia DR3 e as distâncias baseadas na relação Período-Luminosidade publicadas no catálogo de Skowron et al. (2019)[7].

O processo metodológico iniciou-se com a construção de uma amostra de trabalho a partir de um conjunto inicial de 1.589 Cefeidas. Esta amostra foi submetida a um rigoroso processo de seleção e filtragem, aplicando-se os seguintes critérios de qualidade para garantir a robustez da análise:

1. Confiabilidade Astrométrica: Foram selecionadas apenas estrelas com uma razão sinal-ruído da paralaxe no catálogo Gaia DR3 superior a 5. Este critério assegura que as medidas de paralaxe possuem alta precisão estatística.
2. Modo de Pulsação: A amostra foi restrita exclusivamente a Cefeidas que pulsam no modo fundamental. Essa seleção é crucial, pois essas estrelas exibem uma relação período-luminosidade mais estável e bem calibrada, reduzindo a dispersão intrínseca na análise.
3. Qualidade da Paralaxe: Foram mantidas apenas estrelas com valores de paralaxe positivos e com erro relativo inferior a 5%, a fim de evitar dados não físicos e garantir a alta qualidade das distâncias derivadas diretamente da geometria.

Após a aplicação desses filtros, a amostra final foi consolidada em 245 Cefeidas. Para cada estrela desta amostra, a distância foi calculada de duas formas:

(i) diretamente, através da inversão de sua paralaxe (π) do Gaia DR3. A distância em parsecs (dGaia) é dada pela equação:

$$d_{\text{Gaia}} (\text{kpc}) = 1000 / \pi, (1)$$

onde, π é o valor da paralaxe medido em milissegundos de arco (mas).

(ii) indiretamente, utilizando as distâncias do catálogo de Skowron et al. (2019), que são baseadas na relação Período-Luminosidade (P-L). A distância (dPL) obtida a partir deste método é calculada usando o módulo de distância, expresso pela equação:

$$d_{\text{PL}} (\text{pc}) = 10^{(0.2(m_{\lambda} - M_{\lambda} - A_{\lambda}) + 1)}, (2)$$

onde, m_{λ} é a magnitude aparente da estrela na banda de observação λ , A_{λ} é o termo de extinção interestelar nessa mesma banda, e M_{λ} é a magnitude absoluta da estrela, que por sua vez é o valor predito pela relação Período-Luminosidade. As distâncias obtidas pelos dois métodos cobrem uma faixa de 1 a 8 kiloparsecs (kpc), permitindo uma avaliação de possíveis vieses em diferentes escalas.

A investigação da consistência entre os dois conjuntos de distâncias foi realizada por meio de um ajuste estatístico, utilizando um algoritmo de Monte Carlo com Cadeia de Markov (MCMC)[8]. O objetivo desta análise foi obter a distribuição à posteriori dos parâmetros de um modelo linear que descreve a relação entre as distâncias de paralaxe e as distâncias da relação P-L. A quantificação de desvios sistemáticos a partir de uma relação de um para um

(onde o coeficiente angular seria 1 e o intercepto 0) permitiu avaliar a concordância entre os métodos e investigar a influência de variáveis não modeladas, como metalicidade ou extinção residual.

Resultados e Discussões

A análise comparativa entre as distâncias das Cefeidas Clássicas derivadas a partir das paralaxes do Gaia DR3 e aquelas obtidas pela relação período-luminosidade (P-L) constitui o cerne deste trabalho. A apresentação dos resultados é centrada na relação entre essas duas medidas independentes para a amostra final de 245 estrelas.

A relação entre as distâncias de paralaxe (dGaia) e as distâncias da relação P-L (dPL), provenientes do catálogo de Skowron et al. (2019) para a nossa amostra final de 245 Cefeidas, cujos dados são apresentados na Tabela 1 (Anexo C), é visualizada na Figura 1. Visualmente, observa-se uma forte correlação linear entre os dois métodos. No entanto, a maioria dos pontos se encontra ligeiramente acima da linha de identidade, que representa a concordância perfeita (dGaia=dPL), sugerindo a presença de um desvio sistemático.

Figura 1 – Comparação entre as distâncias das Cefeidas obtidas pelas paralaxes do Gaia DR3 (dGaia - eixo y) e as distâncias baseadas na relação Período-Luminosidade do catálogo de Skowron et al. (2019) (dPL - eixo x).

FONTE: Autor (2025)

Para quantificar essa relação de forma robusta, foi realizado um ajuste linear utilizando um algoritmo de Monte Carlo com Cadeia de Markov (MCMC). As distribuições de probabilidade à posteriori para os parâmetros do modelo — coeficiente angular (m) e intercepto (b) — são exibidas na Figura 2.

Figura 2 – Distribuições de probabilidade à posteriori para o coeficiente angular (m) e o intercepto (b) do ajuste linear, obtidas via Cadeia de Markov Monte Carlo (MCMC).

FONTE: Autor (2025)

O ajuste resultou nos seguintes valores para os parâmetros: um coeficiente angular $m = (1,0534 \pm 0,0059)$ e um intercepto $b = (0,0218 \pm 0,0073)$ kpc. O valor do intercepto é estatisticamente diferente de zero com aproximadamente 3 desvios padrão (σ) de significância, indicando um desvio aditivo constante (offset) entre os dois métodos. Além disso, o valor obtido do coeficiente angular m está mais de 9σ acima do valor unitário esperado para uma concordância perfeita, confirmando que o desvio sistemático observado na Figura 1 é estatisticamente robusto.

A discrepância de aproximadamente 3σ no coeficiente linear indica que pode ter um erro sistemático na determinação do ponto zero em uma ou nas duas escalas (Gaia e relação P-L). O coeficiente angular, por sua vez, ser significativamente maior que 1 implica que as distâncias calculadas pela relação P-L são, em média, sistematicamente subestimadas em comparação com as distâncias geométricas do Gaia DR3. Essa subestimação é proporcional à distância, tornando-se mais pronunciada para objetos mais distantes. Este achado levanta questões importantes sobre a calibração da relação P-L, um degrau fundamental da escada de distâncias cósmicas.

A hipótese primária é que a calibração tradicional desta relação pode não estar capturando toda a complexidade da física das Cefeidas ou do meio interestelar. Nossos resultados sugerem que variáveis secundárias, não incluídas no modelo padrão da relação P-L, podem estar influenciando as medidas. Entre os candidatos mais prováveis para explicar essa discrepância, destacam-se:

1. **Metalicidade:** A composição química de uma Cefeida pode afetar sua luminosidade intrínseca. Se a dependência da metalicidade não for totalmente corrigida nos modelos da relação P-L, isso poderia introduzir um viés sistemático como o que foi observado.
2. **Idade da Estrela:** A idade de uma Cefeida está correlacionada à sua massa inicial. Estrelas de diferentes massas (e, portanto, idades) cruzam a Faixa de Instabilidade de maneiras distintas, o que pode resultar em pequenas variações na luminosidade para um mesmo período de pulsação. Se a amostra de calibração da relação P-L e a nossa amostra de trabalho possuírem distribuições de idade sistematicamente diferentes, isso poderia gerar um desvio significativo.

O desvio encontrado aqui corrobora a visão crescente na literatura de que a precisão sem precedentes do Gaia está revelando efeitos sutis que antes estavam ocultos dentro das incertezas das medições. As implicações desses resultados são significativas, uma vez que as Cefeidas são usadas para calibrar as supernovas do tipo Ia. Qualquer viés sistemático na escala de distância das Cefeidas se propaga diretamente para a determinação da Constante de Hubble (H_0). Um refinamento na calibração das distâncias das Cefeidas, como sugerido por nossos dados, é um passo crucial para resolver a "Tensão de Hubble".

Em suma, nossos resultados destacam a importância crítica de se investigar e modelar os efeitos de variáveis secundárias na relação P-L das Cefeidas para calibrar melhor a escada de distâncias cósmicas e, por extensão, nosso entendimento da expansão do Universo.

Conclusão

Este trabalho de iniciação científica investigou a consistência entre as distâncias das Cefeidas Clássicas obtidas a partir das paralaxes geométricas do satélite Gaia (DR3) e aquelas derivadas da relação Período-Luminosidade (P-L) do catálogo de Skowron et al. (2019). O objetivo central foi quantificar a concordância entre esses dois métodos fundamentais para a medição de distâncias no Universo.

A principal conclusão desta análise é a detecção de um desvio sistemático e estatisticamente robusto entre as duas escalas de distância. Para uma amostra de 245 Cefeidas, foi demonstrado que as distâncias calculadas pela relação P-L são sistematicamente subestimadas em comparação com as medições mais diretas do Gaia. Este efeito foi quantificado através de um ajuste linear, que resultou em um coeficiente angular de $m = 1.0534 \pm 0.0059$, um valor que difere da concordância perfeita ($m=1$) com uma significância estatística superior a 9σ . Além disso, foi identificado também uma discrepância de aproximadamente 3σ no coeficiente linear, a qual pode estar associada com um erro sistemático na calibração do ponto zero de uma ou das duas escalas.

Este resultado aponta para a necessidade de se refinar a calibração da relação P-L, que serve como um dos pilares da escada de distâncias cósmicas. A discrepância observada sugere fortemente a influência de variáveis secundárias na luminosidade das Cefeidas, como a metalicidade ou a extinção residual, que não são totalmente contempladas nos modelos de calibração atuais.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação aprofundada do impacto da metalicidade na relação P-L, utilizando dados espectroscópicos para cada estrela da amostra. Adicionalmente, a aplicação de modelos hierárquicos bayesianos mais complexos poderia permitir modelar simultaneamente múltiplos efeitos, ajudando a isolar a origem das discrepâncias aqui reportadas. Aprimorar a precisão deste degrau da escada de distâncias é um passo crítico para calibrar as curvas de luz das supernovas do tipo 1A, as quais são fundamentais para a determinação mais acurada da Constante de Hubble e para a solução da tensão cosmológica atual. A continuação desta pesquisa será, portanto, utilizar esses métodos para formular um ajuste para a relação P-L, visando mitigar os desvios sistemáticos encontrados neste trabalho.

Referências

- [1] LEAVITT, Henrietta S.; PICKERING, Edward C. Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. Harvard College Observatory Circular, v. 173, p. 1-3, 1912. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173....1L/abstract>. Acesso em: 27 ago. 2025.
- [2] HUBBLE, Edwin. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Washington, D.C., v. 15, n. 3, p. 168-173, mar. 1929. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.15.3.168>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- [3] RIESS, Adam G. et al. A 3% Solution: Determination of the Hubble Constant with the Hubble Space Telescope and Wide Field Camera 3. The Astrophysical Journal, v. 730, n. 2, p. 119, mar. 2011. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/730/2/119>. Acesso em: 27 ago. 2025.
- [4] GAUTSCHY, Alfred; SAIO, Hideyuki. Stellar Pulsations Across the HR Diagram: Part I. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Palo Alto, v. 33, p. 75-113, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.33.090195.000451>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- [5] MAJAESS, Daniel J.; TURNER, David G.; LANE, David J. Characteristics of the Milky Way's spiral arms from Cepheid kinematics. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Oxford, v. 398, n. 1, p. 263-270, set. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15096.x>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- [6] Gaia Collaboration, Vallenari A., Brown A.G.A., Prusti T., de Bruijne J. H.J., Arenou F., Babusiaux C., et al., 2023, A&A, 674, A1. doi:10.1051/0004-6361/202243940. Acesso em: 29 ago. 2025.

- [7] SKOWRON, D. M. et al. A three-dimensional map of the Milky Way using classical Cepheid variable stars. *Science*, v. 365, n. 6452, p. 478-482, ago. 2019. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aau3181>. Acesso em: 27 ago. 2025.
- [8] FOREMAN-MACKEY, Daniel et al. emcee: The MCMC Hammer. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, San Francisco, v. 125, n. 925, p. 306-312, fev. 2013. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/670067>. Acesso em: 28 ago. 2025.

Anexos

Figura 1 – Comparação entre as distâncias das Cefeidas obtidas pelas paralaxes do Gaia DR3 (dGaia - eixo y) e as distâncias baseadas na relação Período-Luminosidade do catálogo de Skowron et al. (2019) (dPL - eixo x).

Figura 2 – Distribuições de probabilidade à posteriori para o coeficiente angular (m) e o intercepto (b) do ajuste linear, obtidas via Cadeia de Markov Monte Carlo (MCMC).

Tabela 1. Tabela da amostra final das Cefeidas tratada neste trabalho. Nota: A tabela completa disponível online:
https://raw.githubusercontent.com/EzequielASoares/Cepheids_Research/refs/heads/main/Cefeidas_XMatch_Filtered/dados_finais.csv

CÓDIGO: ET0595

AUTOR: ELBER KLEBERSON MARTINERI FERNANDES

ORIENTADOR: RUMMENIGGE RUDSON DANTAS

TÍTULO: Aprimoramento da versão imersiva do jogo sério de treinamento de equilíbrio postural Virtualter

Resumo

Este trabalho descreve o desenvolvimento e a avaliação de uma nova versão do VIRTUALTER, um jogo sério em realidade virtual (RV) projetado para a reabilitação do equilíbrio. Partindo do desafio da baixa adesão à fisioterapia tradicional devido a exercícios repetitivos, o projeto utiliza a gameterapia imersiva para aumentar o engajamento e a motivação de pacientes, especialmente idosos. A metodologia envolveu uma fase de pesquisa e uma de desenvolvimento iterativo na engine Unity, com validação contínua por fisioterapeutas. O principal resultado foi a transição de um ambiente com alvos abstratos para um cenário temático de uma floresta noturna, onde o usuário captura vaga-lumes. Os testes indicaram alta aceitação e feedback positivo, mostrando que o design lúdico foi eficaz em induzir um estado de "fluxo" (flow), mesmo com desafios técnicos menores. A conclusão aponta que, embora promissor, o projeto necessita de aprimoramentos futuros, como a expansão da duração das sessões e, crucialmente, o desenvolvimento de uma plataforma mais robusta para os fisioterapeutas, com melhores ferramentas de controle e análise de dados do paciente.

Palavras-chave: Gameterapia, Realidade Virtual, Reabilitação do Equilíbrio, Jogo Sério

TITLE: Improvement of the immersive version of the serious postural balance training game Virtualter

Abstract

This work describes the development and evaluation of a new version of VIRTUALTER, a serious game in virtual reality (VR) designed for balance rehabilitation. Addressing the challenge of low adherence to traditional physical therapy due to repetitive exercises, the project uses immersive gametherapy to increase the engagement and motivation of patients, especially the elderly. The methodology involved a research phase and an iterative development phase in the Unity engine, with continuous validation by physical therapists. The main result was the transition from an environment with abstract targets to a thematic night forest scenario, where the user catches fireflies. Testing indicated high acceptance and positive feedback, showing that the playful design was effective in inducing a "flow" state, even with minor technical challenges. The conclusion points out that, although promising, the project requires future improvements, such as extending the duration of sessions and, crucially, developing a more robust platform for physical therapists, with better tools for patient data control and analysis.

Keywords: Gametherapy, Virtual Reality, Balance Rehabilitation, Serious Game.

Introdução

A gameterapia é uma abordagem de reabilitação que utiliza jogos digitais para tornar as sessões de fisioterapia mais dinâmicas, mostrando-se especialmente promissora no treinamento de equilíbrio em diversas populações, como idosos e pacientes pós-AVC (Perracini & Gazzola, 2009; MARQUES-SULE et al., 2021). Esse modelo de terapia foi consolidado com tecnologias como o Nintendo Wii (Utkan et al., 2018) e o Xbox Kinect (Xavier-Rocha et al., 2020). A prática desse tipo de terapia com games demonstrou grande potencial, mas estagnou com a evolução tecnológica, já que os consoles modernos abandonaram os sensores de movimento integrados (MARQUES-SULE et al., 2021). Um dos principais obstáculos para a eficácia da fisioterapia tradicional é a necessidade de exercícios repetitivos, fator que contribui para a baixa adesão ao tratamento (RAHMANI-KATIGARI et al., 2023). A gameterapia com realidade virtual (RV) surge como uma solução para este desafio, transformando tarefas terapêuticas em mecânicas de jogo. Ao focar na diversão e em objetivos lúdicos, os pacientes apresentam maior engajamento e continuidade (RAHMANI-KATIGARI et al., 2023). Além disso, a capacidade da RV de modular a percepção de dor é um fator clinicamente relevante, com estudos demonstrando reduções significativas na dor percebida durante os exercícios (BREA-GÓMEZ et al., 2021). Apesar do conceito de RV ser geralmente associado ao uso de óculos com display de LED integrados, com confere mais imersão, é comum dividir a RV para terapias em duas classes: a semi-imersiva e a imersiva. A semi-imersiva usa como display um monitor ou projetor ligados a uma computador, ou seja, o display não está nos olhos do paciente. Esse tipo de abordagem abarca as plataformas citadas no início (Nintendo Wii e o Xbox Kinect). Já na imersiva temos o uso dos óculos com display de LED montados. É nesse contexto que este trabalho propõe a evolução do "jogo sério" VIRTUALTER (Medeiros et al., 2021), aplicando esses benefícios de forma direcionada. Este jogo foi criado como sendo um jogo de realidade virtual semi-imersiva. Agora ele está migrando para versão imersiva. O objetivo é desenvolver uma nova versão do jogo que expande a interação do usuário para além do movimento em pé, introduzindo exercícios funcionais que permitam a escolha do paciente para que ele fique em pé ou sentado. O propósito central do projeto é duplo: primeiramente, criar uma ferramenta clínica eficaz e motivadora. Secundariamente, avaliar como os idosos reagem a esta nova forma de interação, contribuindo para o avanço da gameterapia no tratamento de distúrbios do equilíbrio.

Metodologia

O desenho metodológico do projeto foi estruturado em partes claras e interdependentes, combinando pesquisa preparatória, desenvolvimento técnico e um processo de validação ágil e colaborativo. Parte 1 sendo a pesquisa e análise preparatória este momento foi dedicado a estabelecer uma base sólida para o design do jogo. Para isso, foi realizada uma análise de benchmarking de aplicativos de reabilitação na Meta Quest Store, focada em identificar mecânicas de jogo eficazes, soluções de performance e estratégias anti-cinetose (cybersickness). Em paralelo, conduzimos experimentos técnicos no Oculus Quest 3 para mapear os limites da plataforma em renderização e velocidade de movimento. As conclusões desta pesquisa, somadas às discussões sobre as limitações de locomoção de versões anteriores do projeto, foram cruciais para definir a diretriz estratégica principal: focar a nova versão em interações manuais e em uma experiência de usuário mais lúdica e imersiva. Parte 2 sendo o desenvolvimento iterativo e a validação contínua, tendo uma direção estratégica bem

definida, iniciou-se o desenvolvimento do protótipo para isso nós usamos dois componentes principais: a Unity, que é uma plataforma de construção para a criação de jogos digitais, sendo o local escolhido para construirmos o mundo do jogo, e o Meta XR SDK, que é um kit de ferramentas especiais distribuído pela Meta que conecta nosso jogo aos óculos de realidade virtual e permite que toda a mágica da interação aconteça. O processo foi organizado em um ciclo iterativo, onde versões de teste eram desenvolvidas e submetidas a validações periódicas com uma equipe de fisioterapeutas. Esse fluxo de trabalho garantiu que o projeto evoluísse com um alinhamento constante entre a viabilidade técnica e a relevância terapêutica. A estabilidade de performance foi tratada como prioridade, realizando-se uma otimização rigorosa de todos os recursos visuais do jogo. O objetivo foi assegurar uma taxa de quadros (FPS) alta e constante para garantir uma experiência fluida e mitigar a cinetose (enjoo de movimento), um fator crítico em aplicações de realidade virtual. Adicionalmente, a segurança e o conforto do usuário foram pilares centrais, endereçados pela integração de sistemas anti-cybersickness. Para isso, adotou-se o "vignette" dinâmico, que escurece o campo de visão periférico durante o movimento, e adicionou-se um ponto de referência fixo ao cenário — a fogueira — para servir como uma âncora visual e fortalecer a orientação espacial do paciente.

Resultados e Discussões

O processo de criar um design iterativo, guiado por observações e feedback qualitativo da equipe de fisioterapia, resultou em refinamentos significativos no ambiente virtual e nas mecânicas de jogo, visando aumentar a imersão, o engajamento e a aceitação do usuário. A principal decisão de design foi a transição de um cenário com alvos abstratos (bolas coloridas) para um ambiente com maior coerência temática e narrativa. Optou-se pela criação de uma floresta noturna, onde os exercícios de alcance foram diretamente integrados à tarefa de capturar vaga-lumes com uma rede. Essa abordagem, que substitui elementos arbitrários por componentes que fazem sentido dentro do universo do jogo, é fundamental para aumentar a sensação de presença e a imersão do usuário no ambiente virtual (Slater, 2009). Na fase de testes de usabilidade com adultos saudáveis, a resposta dos participantes a essa nova abordagem foi majoritariamente positiva. Relatou-se que o cenário de acampamento noturno gerava uma sensação de conforto e familiaridade, facilitando a aceitação da "realidade imposta". O sucesso da interação foi reforçado por um sistema de feedback multimodal, com estímulos visuais (brilho dos vaga-lumes, efeitos de captura) e sonoros claros, que confirmavam as ações do jogador. Juntamente com elementos de gamificação, como um sistema de pontuação em tempo real, essas mecânicas contribuíram para uma experiência de usuário mais motivadora e gratificante (Deterding et al., 2011). Essa percepção positiva é validada de forma quantitativa e robusta pela System Usability Scale (SUS), uma metodologia padrão da indústria para medir a usabilidade percebida de um sistema (BROOKE, 1996). É crucial entender que a pontuação média de milhares de produtos avaliados com a SUS é de 68 (BANGOR; KORTUM; MILLER, 2008). Nesse contexto, a pontuação de 93.75 alcançada pela nova versão do VIRTUALTER não é apenas alta, mas excepcional. Este resultado posiciona o sistema na categoria mais alta de avaliação, correspondente a uma nota "A" ou "Excelente", e o coloca no percentil superior de todos os produtos já testados, comprovando que a experiência criada é de classe mundial em termos de facilidade de uso e satisfação do usuário. Um resultado fundamental do design iterativo foi a tradução bem-sucedida de objetivos clínicos em mecânicas de jogo. A tarefa de "capturar vaga-lumes" foi deliberadamente projetada para mascarar exercícios terapêuticos. Cada alvo é posicionado estrategicamente no ambiente virtual para eliciar movimentos específicos,

como a rotação de tronco, a flexão de ombro em diferentes amplitudes e o deslocamento de peso mediolateral e anteroposterior. Discutimos com a equipe de fisioterapia que, ao focar na tarefa lúdica, os pacientes tendem a realizar um volume maior de repetições com maior amplitude de movimento do que fariam em um exercício convencional, potencializando os ganhos terapêuticos. É importante discutir que os testes de usabilidade descritos nesta fase foram conduzidos com um grupo de adultos jovens e saudáveis para validar a mecânica e a experiência geral do jogo. Embora os resultados sejam extremamente positivos, eles representam a aceitação da tecnologia por um público sem as limitações motoras ou cognitivas da população-alvo final. Portanto, estes resultados devem ser vistos como uma validação de prova de conceito, sendo um passo crucial e necessário antes do início dos ensaios clínicos com idosos e pacientes em reabilitação, que constituirão a próxima fase deste projeto.

Conclusão

Apesar dos desafios técnicos identificados, como quedas na taxa de quadros (FPS), o feedback geral sobre a experiência com o VIRTUALTER permaneceu extremamente positivo. A observação de que os participantes expressaram prazer e interesse em continuar jogando sugere que o design lúdico foi eficaz em induzir um estado de "fluxo" (flow), um indicador chave para a adesão terapêutica. A avaliação da usabilidade revelou uma melhora quantitativa expressiva. Enquanto a versão anterior do protótipo, baseada em alvos abstratos, já apresentava uma boa avaliação com média de 87.7 na Escala SUS, a nova versão temática alcançou 93.75. Discute-se que este aumento de mais de 6 pontos percentuais se deve primariamente à introdução da coerência narrativa. O cenário de floresta e a tarefa de capturar vaga-lumes geraram maior conforto e familiaridade, como relatado no feedback qualitativo, o que se traduziu em uma experiência percebida como mais intuitiva, agradável e, consequentemente, mais "usável". Este resultado excepcional, somado ao reconhecimento da qualidade técnica do projeto através do registro de software junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), consolida o VIRTUALTER como uma base de sucesso. No entanto, este estudo reconhece que o protótipo atual é a fundação para uma ferramenta clínica ainda mais robusta. Olhando para o futuro, alguns pontos são cruciais: é preciso investigar como expandir a experiência para além dos cinco minutos, mantendo o mesmo nível de atratividade em sessões terapêuticas mais longas. Adicionalmente, um foco importante será o aprimoramento da plataforma para a equipe de fisioterapia. É fundamental desenvolver uma interface de rápido entendimento, que não só melhore a experiência do profissional, mas que também forneça relatórios mais detalhados sobre o desempenho dos usuários. Conceder mais controle e acesso a dados para os fisioterapeutas permitirá uma personalização mais eficaz da terapia, solidificando o VIRTUALTER como uma solução de gameterapia completa e eficiente.

Referências

MARQUES-SULE, E. et al. Effectiveness of Nintendo Wii and physical therapy in functionality, balance, and daily activities in chronic stroke patients. *Journal of the American Medical Directors Association*, v. 22, n. 5, p. 1073–1080, 2021. RAHMANI-KATIGARI, M.; MOHAMMADIAN, F.; SHAHMORADI, L. Development of a serious game-based cognitive rehabilitation system for patients with brain injury. *BMC psychiatry*, v. 23, n. 1, p. 893, 2023. BREA-GÓMEZ, B. et al. Virtual reality in the treatment of adults with chronic low back

pain: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *International journal of environmental research and public health*, v. 18, n. 22, p. 11806, 2021. SLATER, Mel. Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, v. 364, n. 1535, p. 3549–3557, 2009. Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., & Nacke, L. (2011). From game design elements to gamefulness: defining "gamification". In *Proceedings of the 15th international academic MindTrek conference: Envisioning future media environments* (pp. 9-15). Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The Psychology of Optimal Experience*. Harper & Row. Utkan Karasu, A., Batur, E. B., & KAYMAK KARATAŞ, G. (2018). Effectiveness of Wii-based rehabilitation in stroke: A randomized controlled study. *Journal of Rehabilitation Medicine (Stiftelsen Rehabiliteringsinformation)*, 50(5). Xavier-Rocha, T. B., Carneiro, L., Martins, G. C., Vilela-Junior, G. D. B., Passos, R. P., Pupe, C. C. B., ... & Monteiro-Junior, R. S. (2020). The Xbox/Kinect use in poststroke rehabilitation settings: a systematic review. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, 78(06), 361-369. Medeiros, C. S. P. D., Pacheco, T. B. F., Dantas, R. R., & Cavalcanti, F. A. D. C. (2021). Development and validity of a serious game (VirtualTer) for postural balance rehabilitation in older adults. *Simulation & Gaming*, 52(6), 735-752. Singh, S., & Kaur, A. (2022, November). Game development using unity game engine. In *2022 3rd International Conference on Computing, Analytics and Networks (ICAN)* (pp. 1-6). IEEE. Aros, M., Tyger, C. L., & Chaparro, B. S. (2024, June). Unraveling the meta quest 3: an out-of-box experience of the future of mixed reality headsets. In *International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 3-8). Cham: Springer Nature Switzerland. Rebenitsch, L., & Owen, C. (2016). Review on cybersickness in applications and visual displays. *Virtual reality*, 20(2), 101-125. BROOKE, John. SUS: a "quick and dirty" usability scale. In: JORDAN, P. W. et al. (Orgs.). *Usability evaluation in industry*. London: Taylor & Francis, 1996. p. 189-194. BANGOR, Aaron; KORTUM, Philip T.; MILLER, James T. An empirical evaluation of the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, v. 24, n. 6, p. 574-594, 2008.

CÓDIGO: ET0645

AUTOR: RHYAN BELARMINO VANDERLEY

ORIENTADOR: RONAI MACHADO LISBOA

TÍTULO: Prototipagem e inovação com internet das coisas

Resumo

Nos laboratórios didáticos para o ensino de física são empregados sensores do tipo barreira de luz para medidas e registros de tempo, posição e grandezas derivadas. Esses sensores possuem custo elevado são encontrados nas bancadas aos pares e permitem poucas medidas de intervalos de tempo. Propomos a construção de um sensor de barreira de luz conectado à internet a fim de medir e registrar várias medidas de tempo e velocidade de um carrinho sobre um trilho de ar. O sensor construído na plataforma ESP32 permite várias medidas de tempo quando o sensor de luminosidade detecta franjas claras/escuras ao longo do movimento do carrinho. As medidas são registradas e enviadas por uma conexão sem fios para uma página web para posterior análise. O protótipo é capaz de ler tempos da ordem de milissegundos e velocidades compatíveis com os sensores proprietários. Os resultados evidenciam o impacto significativo da metodologia adotada, contribuindo para a melhoria das atividades experimentais do laboratório de física da Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN.

Palavras-chave: ESP32. sensor de barreira de luz. internet das coisas.

TITLE: Prototyping and innovation with the Internet of Things

Abstract

In physics teaching laboratories, light barrier sensors are commonly used for measuring and recording time, position, and derived quantities. These sensors are expensive, usually available in pairs, and allow only a limited number of time interval measurements. We propose the development of an internet-connected light barrier sensor designed to measure and record multiple time and velocity values of a cart moving on an air track. The sensor, built on the ESP32 platform, enables multiple time measurements as the photodetector registers bright/dark fringes along the cart's motion. The measurements are stored and transmitted wirelessly to a web page for further analysis. The prototype is capable of detecting times on the millisecond scale and velocities comparable to those obtained with proprietary sensors. The results highlight the significant impact of the proposed methodology, contributing to the improvement of experimental activities in the Physics Laboratory of the School of Science and Technology at UFRN.

Keywords: ESP32. photogate. internet of things.

Introdução

Nos laboratórios de ensino de Física são encontrados diversos sensores utilizados para medir grandezas físicas como tempo, posição, velocidade, aceleração, força, tensão, corrente elétrica, campos magnéticos e elétricos, entre outras. Na área da Cinemática, os sensores de barreira de luz são empregados para medir o tempo e a posição quando um carrinho de comprimento fixo atravessa o sensor. A partir dessas grandezas, podem ser calculadas outras, como velocidade, aceleração, momento e energia cinética.

Esses sensores são comercializados a custos elevados, e a escassez de recursos normalmente permite a aquisição de, no máximo, dois sensores por bancada [1]. Essa limitação faz com que, durante a prática experimental, possam ser registradas no máximo três medidas de tempo: a passagem pelo sensor 1, a passagem pelo sensor 2 e o intervalo entre os dois. Para obter mais medidas de tempo, é necessário deslocar os sensores ao longo do movimento do carrinho, o que aumenta as incertezas devido à imprecisão na nova posição de cada sensor.

Neste plano de trabalho, utilizamos o ESP32 [2], fotossensores emissores e receptores, além de outros dispositivos eletrônicos, para desenvolver um sensor de luz capaz de detectar o tempo de passagem de um objeto móvel e o tamanho desse objeto quando o feixe de luz é interrompido. A vantagem da nossa proposta é que o protótipo é sem fio e pode se mover juntamente com o carrinho, ao contrário de permanecer fixo sobre a bancada.

Os sensores do protótipo permitem várias medidas de tempo quando detectam as franjas claras e escuras igualmente espaçadas ao longo de uma régua posicionada no comprimento do trilho de ar. A literatura apresenta a possibilidade de desenvolver sensores de barreira de luz de baixo custo para aplicação em laboratórios didáticos [3,6]. Testamos alguns dos circuitos apresentados na literatura e verificamos que a solução do ESP32 e um sensor de velocidades é suficiente para medidas adequadas aos equipamentos proprietários. Além disso, nesses casos, os hardwares propostos são fixos à bancada experimental e construídos com conexões cabeadas para a medição e registro das variáveis (tempo, deslocamento e grandezas derivadas), o que limita o número de medidas possíveis.

O objetivo deste trabalho é aperfeiçoar um estudo anterior, no qual foi utilizado o Arduino com conexões cabeadas [7], empregando agora um sensor de barreira de luz móvel e sem fio, que pode se deslocar junto ao objeto e registrar as variáveis físicas de interesse ao percorrer uma pista retilínea paralela a uma régua com franjas claras e escuras igualmente espaçadas. Os dados são então enviados para uma página web, possibilitando posterior análise pelos estudantes.

Metodologia

O protótipo consiste em um emissor e um receptor de luz posicionados próximos um ao outro em um único módulo que é reconhecido como sensor de velocidades. Quando ocorre a interrupção do feixe infravermelho por uma sequência de franjas escuras intercaladas com franjas claras há o registro do tempo. Na Figura 1, apresentamos os hardwares: microcontrolador ESP32 e o sensor de velocidade

LM393, que possui uma ranhura de 5 mm pela qual passa as franjas claras e escuras.

O ESP32 tem duas funções principais: ler as quedas de tensão quando há interrupção do feixe luminoso e transferir os registros para o computador por meio de comunicação sem fio. As medidas de tempo e deslocamento (comprimento das franjas) são apresentadas em uma página html para análise.

O ESP32 dispõe da função ESP Timer que é útil quando o software do usuário precisa realizar ações atrasadas ou periódicas, como a inicialização postergada do dispositivo e se mostrou adequado para a construção e o funcionamento do protótipo, uma vez que permite registros de tempo da ordem de milissegundos.

FIGURA 1

Na Figura 2, apresentamos o circuito eletrônico utilizado no protótipo: uma protoboard e cabos conectores, o sensor de velocidades LM393, o ESP32 todos conectados da seguinte forma:

- cabo vermelho: saída de tensão contínua conectada à porta de alimentação de 3,3V do ESP32;
- cabo preto: a saída de aterramento conectada ao GND do ESP32;
- cabo azul: a saída digital (D0) conectada a uma porta GPIO do ESP32.

FIGURA 2

Nesse circuito, quando a intensidade da luz está abaixo do valor ajustado no potenciômetro do módulo LM393, a saída do sensor permanece em nível lógico alto; quando a intensidade da luz ultrapassa o valor configurado, a saída passa para nível lógico baixo. Esse valor de limiar pode ser ajustado por meio do trimpot (potenciômetro) presente no módulo, que regula a saída digital (D0).

O processamento e disponibilização dos dados ao usuário é feito a partir de um script/sketch de controle do hardware que registra o tempo, calcula a velocidade, cria uma conexão Wi-Fi e gera uma página web para apresentação das informações. Na IDE do Arduino o modelo de placa é selecionado (ESP32-Wemos-WiFi&Bluetooth) em conjunto com as bibliotecas necessárias.

Ao ligar o ESP32 como módulo de bateria como fonte de energia, o dispositivo disponibiliza a rede Wi-Fi com SSID "Configurar ESP32". O usuário deve conectar o desktop a essa rede; uma janela de configuração será aberta, na qual ele deverá selecionar a SSID da rede Wi-Fi do celular e digitar a senha de acesso pessoal. Em seguida, o desktop deve ser reconectado à rede do celular. Finalmente, basta acessar o endereço <http://p1esp32.local> no navegador do desktop para visualizar o site hospedado no ESP32 e consultar os dados mostrados na página html.

Para o registro dos tempos foram construídas três grades intercalando franjas escuras e claras com diferentes larguras: (1) escura com 1,8 cm e clara com 3,0 cm; (2) escura com 5,0 cm e clara com 10 cm; (3) escura com 10,0 cm e clara com 10,0 cm. Na Figura 3, vê-se uma arte de uma grade com franjas escuras de 5,0 cm e claras de 10,0 cm (fora de escala). A distância entre o início de uma franja escura e o início da próxima é de 15,0 cm. Esses valores são utilizados para o cálculo da velocidade e de outras grandezas cinemáticas, como a aceleração do carrinho.

FIGURA 3

Na Figura 4, mostramos o carrinho e o protótipo. Sobre o carrinho há a régua com franjas claras e escuras. O ESP32 e a bateria (face oposta da imagem) foram ajustadas a uma caixa construída em uma impressora 3D. À medida que o carrinho sobre o trilho de ar inclinado entra em movimento, o sensor mede os intervalos de tempo da passagem: (i) ao longo de uma franja escura e (ii) entre as franjas escuras. A grade foi construída com placas de acrílico escuras com lado de 5,0 cm, espaçadas uma das outras por um comprimento de 10 cm e fixadas com fita isolante a uma régua de acrílico com espessura menor que 5 mm. Essa configuração foi escolhida porque tem as mesmas dimensões do equipamento utilizado no laboratório de física da Escola de Ciências e Tecnologia.

FIGURA 4

A partir dos intervalos de tempo e da largura das franjas (escuras ou claras) é possível calcular a rapidez do carrinho com a equação da cinemática:

EQUAÇÃO 1

onde L representa a largura de uma franja e Δt é o intervalo de tempo registrado pelo sensor ao passar pela franja. A mesma equação se aplica para a largura entre as franjas.

O cálculo da aceleração pode ser realizado a partir da variação das velocidades sucessivas à medida que o carrinho se desloca ao longo do trilho de ar. A aceleração média pode ser calculada por:

EQUAÇÃO 2

que mostra a necessidade de duas medidas de velocidade e a medida do intervalo de tempo entre essas duas medidas. Esses dois instantes de tempo precisam ser próximos a fim de que a aceleração média seja uma boa medida da aceleração instantânea. O denominador precisa ser corrigido para que a aceleração seja calculada corretamente,

EQUAÇÃO 3

onde Δt é o intervalo de tempo entre as franjas escuras, v_1 e v_2 são os intervalos de tempo ao passar por duas franjas escuras consecutivas e v_1 e v_2 são as velocidades respectivas calculadas a partir da equação 1 [8,9].

Resultados e Discussões

Os intervalos de tempo foram registrados a partir da função: `esp_timer_get_time()` do ESP32. Como o registro é feito na unidade de microssegundos (μs), os valores de tempo foram convertidos para segundos ao dividir o resultado por um fator de 10^6 .

A velocidade foi então calculada pela definição apresentada na equação (1), expressa em centímetros por segundo (cm/s). A aceleração foi calculada com a equação (3) para o protótipo apresentado e com a equação (4) para o equipamento do laboratório.

A Figura 5.(a), mostra os registros dos tempos e velocidades que são apresentados em uma página HTML. O código foi desenvolvido no ambiente de programação (IDE) do Arduino para exibir os intervalos de tempo Δt (s) e o cálculo da velocidade v (cm/s) para a largura de franja escura de $\Delta L_{\text{franja}} = 5,0$ cm e para o espaçamento entre franjas escuras de $\Delta L_{\text{entre}} = 10,0$ cm. A marcação em vermelho indica que a medida deve ser descartada, pois corresponde ao tempo de espera do sensor enquanto o carrinho não passa pela primeira franja escura. Assim, a Figura 5.(a), mostra 4 conjuntos de dados que correspondem as três franjas escuras e duas franjas claras, conforme mostrado nas Figuras 3 e 4. A Figura 5.(b), mostra os registros dos tempos obtidos com o hardware proprietário do laboratório de física. Os tempos não são iguais pois as medias foram coletadas em posições diferentes do trilho de ar. Logo, as velocidades serão diferentes, mas que não afeta o cálculo da aceleração, uma vez que essa é constante ao longo do trilho de ar inclinado.

FIGURA 5

A Tabela 1, mostra os dados apresentados na Figura 5, o cálculo da aceleração, a_{exp} em cm/s^2 , utilizando a Equação (2), a aceleração obtida com hardware proprietário do laboratório de Física, a_{lab} em cm/s^2 e o erro relativo percentual entre as duas medidas. A medida A refere-se ao primeiro par de franjas escuras e a medida B refere-se ao segundo par de franjas escuras da régua mostrada nas Figuras 3 e 4.

TABELA 1

As acelerações calculadas a partir dos resultados das velocidades e dos instantes de tempo utilizando o protótipo, apresentado nesse trabalho, são mais precisas em comparação às acelerações obtidas com o hardware proprietário. Contudo, ao considerar a aceleração do laboratório como um valor de referência, a acurácia dos resultados do protótipo apresenta uma certa discrepância, mas que não ultrapassa um erro percentual de 10%. Para cada rodada de medidas de 1 a 4, é possível notar uma dispersão pequena para as medidas de tempo, algo que não foi observado para os tempos medidos com o hardware proprietário que apresentou uma

dispersão maior na passagem da segunda franja escura (B). Isso se refletiu na medida da aceleração ao passar pela segunda franja escura. Na medida 1, a diferença entre a aceleração nas passagens consecutivas A e B é de 0,626% para o protótipo. Por outro lado, para o hardware proprietário a diferença é de 4,189%. As medidas de velocidade e aceleração utilizando um trilho de ar nos laboratórios de física requer bastante cuidado, pois há sutilezas na eletrônica dos equipamentos empregados [8,9].

Conclusão

Nesse plano de trabalho, desenvolvemos um protótipo de sensor de barreira de luz (photogate) utilizando um módulo sensor óptico conectado a uma placa ESP32, para registrar os tempos de passagem de um objeto em movimento ao detectar franjas claras e escuras impressas em uma régua. A partir do espaçamento entre as franjas escuras e das medidas de tempo, fomos capazes de calcular a velocidade e a aceleração do carrinho.

A aceleração obtida com nosso protótipo mostrou-se mais precisa em relação ao instrumento utilizado no laboratório de física, mas a acurácia entre os resultados é da ordem de 10%. A construção da régua com franjas claras e escuras foi feita manualmente e não há precisão sobre os espaços entre as franjas escuras. Portanto, a régua contendo essas franjas podem resultar em um melhor resultado se construídas com uma impressora 3D.

Enquanto fizemos apenas 4 rodadas de medidas utilizando um único sensor, o equipamento do laboratório requer mais medidas e dois sensores: um para medir os tempos em cada franja escura e outro para medir o tempo entre as franjas escuras.

Nossos próximos passos incluem: (1) testar sensores mais sensíveis, com maior precisão; (2) integrar um acelerômetro ao circuito, de modo a permitir medidas bidirecionais (esquerda/direita e direita/esquerda) ao longo do trilho de ar; (3) construir uma régua em impressora 3D que tenha o comprimento do trilho de ar. A inclusão do acelerômetro é fundamental para estudar os movimentos nos experimentos de colisão de carrinhos, utilizados para o estudo da conservação do momento linear e da energia.

Os testes realizados mostraram resultados adequados para um laboratório didático utilizando equipamentos com custo bastante inferior àqueles proprietários. Os intervalos de tempo, e as velocidades calculadas foram compatíveis com os valores obtidos utilizando hardware proprietário disponível no laboratório de Física da Escola de Ciências e Tecnologia.

Referências

[1] PHYWE. Disponível em: <https://www.phywe.com>. Acesso em: 27 ago. 2024.

[2] ESPRESSIF. ESP32. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 27 ago. 2024.

[3] NETO, J. T. C.; APOLINÁRIO, F. R.; SOARES, A. A. Sistema photogate de seis canais analógicos para laboratórios didáticos de física. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 40, n. 1, e1504, 2018.

[4] DIONISIO, G.; MAGNO, W. C. Photogate de baixo custo com a porta de jogos do PC. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 2, p. 287-293, 2007.

[5] LADINO, L. A.; RONDÓN, S. H. A low-cost Arduino-based photogate system. Physics Education, v. 54, p. 015006, 2019.

[6] SOMOGYI, A.; KELEMEN, A.; MINGESZ, R. Development of a low-cost photogate system. Journal of Physics: Conference Series, v. 2297, p. 012031, 2022.

[7] FERNANDES, J. O. N.; LISBOA, R. Desenvolvimento de sensores de detecção e comunicação empregando eletrônica e internet das coisas com Arduino. In: XXXV Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica, 2024.

[8] BEZERRA, A. B.; BARROS, R. F. E.; MOREIRA, A. B.; LISBOA, R.; LISBOA, R.; FERREIRA, P. C. Uma proposta de medida de g inspirada em exercício de texto didático do professor Moysés Nussenzveig. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 45, p. e20230075-1-5, 2023.

[9] MOREIRA, A. B.; FERREIRA, P. C.; LISBOA, R.; LISBOA, R. Optimizing acceleration measurements using a single photogate. European Journal of Physics, v. 42, p. 055003, 2021.

Anexos

Figura 1 – (a) Microcontrolador ESP32, modelo WROOM-32 WiFi e Bluetooth com módulo para bateria. (b) Sensor de velocidades LM383 com emissor e receptor ópticos.

Figura 2 - Protótipo do sensor de barreira de luz.

Figura 3 - Régua com franjas escuras e claras.

Figura 4 – Carrinho, o sensor de velocidades, régua com franjas claras e escuras.

Figura 5. (a) Registro dos tempos e o cálculo da velocidade à medida que o protótipo passa pela régua com franjas claras e escuras quando o trilho de ar está na horizontal. (b) Medidas dos tempos coletadas com o hardware proprietário do laboratório.

Tabela 1

Equação 1

Equação 2

Equação 3

Página 1

Página 2

Página 3

Página 4

Página 5

Página 6

Página 7

CÓDIGO: ET0657

AUTOR: THAMIRYS CAROLLINA BARBOSA DE BARROS

COAUTOR: CAUÃ MEDEIROS PEREIRA

ORIENTADOR: ORIVALDO VIEIRA DE SANTANA JUNIOR

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DO FRONTEND E BACKEND DE UM CHATBOT EDUCACIONAL

Resumo

Os chatbots são um grande auxílio educacional que surgiu com a finalidade de reparar algumas fissuras na área educacional. Diante disso, esse artigo tem a finalidade de expor o desenvolvimento do frontend e backend do chatbot educacional direcionado para a matéria Lógica de Programação na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O sistema foi realizado na linguagem de programação Python, além de recursos do Framework Streamlit e Google Generative AI API.

O funcionamento do backend está contido no gerenciamento de dados, armazenamento de histórico de interações e transmissão de mensagens para a API do google, já o frontend está presente na organização dos elementos visuais que compõem a interface e simplificam a interação entre discente, usuário do sistema, e o chatbot educacional.

Palavras-chave: Chatbot Educacional; Frontend; Backend; Inteligência Artificial.

TITLE: DEVELOPMENT OF THE FRONTEND AND BACKEND OF AN EDUCATIONAL CHATBOT

Abstract

Chatbots are a major educational aid that emerged with the purpose of addressing certain gaps in the educational field. In this context, this article aims to present the development of the frontend and backend of an educational chatbot designed for the Logic of Programming course at the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN). The system was developed using the Python programming language, as well as resources from the Streamlit Framework and the Google Generative AI API.

The backend operation involves data management, interaction history storage, and message transmission to the Google API, while the frontend is responsible for organizing the visual elements that compose the interface and facilitate interaction between the student, the system user, and the educational chatbot.

Keywords: Educational Chatbot; Frontend; Backend; Artificial Intelligence.

Introdução

A busca incessante do homem para se aproximar e familiarizar-se com a máquina tem possibilitado o desenvolvimento das mais diversas ferramentas inovadoras, que auxiliam no suporte à prática e aprendizagem em variados âmbitos, com ênfase para o contexto educacional. A área educacional, em que vivenciamos atualmente, enfrenta incontáveis desafios que se destacam a falta de atenção, acesso desigual e métodos de ensino pouco dinâmicos. De acordo com Alyahya e Alshmrany (2023), os chatbots surgem como uma solução promissora para facilitar esse processo, contendo recursos da Inteligência Artificial permitem a obtenção de respostas rápidas, suporte contínuo ao discente e feedback frequente

Os Chatbots são uma ferramenta de conversação que se comporta de maneira semelhante aos seres humanos, tentando se aproximar da linguagem natural utilizada no cotidiano. Sendo o resultado dos avanços tecnológicos das pesquisas em Inteligência Artificial (IA), grande parte de projetos de “bots” desenvolvidos vem cada vez mais sendo otimizados com o objetivo de desempenhar uma linguagem natural humana, analisar e influenciar o comportamento do usuário (AQUINO; ADANIYA, 2018).

Nesse contexto, torna-se importante entender além da parte lógica que compõe o funcionamento dos chatbots, e compreender a forma como elas se dispõem para o usuário e sua estrutura. O front end é o início dessa interação, sendo responsável por converter informações complexas em uma experiência simplificada para o usuário e que seja visualmente agradável, enquanto o backend centraliza-se no processamento das perguntas realizadas, gerenciamento de dados e comunicação com API .

Assim, este artigo tem como intuito analisar o frontend e backend do chatbot desenvolvido para o auxílio dos discentes que estão matriculados na matéria de Lógica de Programação, posteriormente metodologia e por fim, a conclusão, que resume as descobertas, aprendizados e possibilidades para o futuro.

Metodologia

1. Tipo de Pesquisa

A pesquisa pode classificar-se como uma pesquisa aplicada, já que a mesma busca solucionar problemas de evasão encontrados na matéria Lógica de Programação na UFRN, sendo possível caracterizar como uma ferramenta de apoio educacional. Além do mais apresenta uma abordagem descritiva e exploratória, já que surge como uma exploração das ferramentas disponibilizadas pela inteligência artificial no âmbito de ensino e será disponibilizado aos discentes como um chatbot interativo. Tal tecnologia permite avaliar como a evolução tecnológica pode beneficiar o contexto acadêmico com novas estratégias de aprendizagem e ensino, além de tornar a interação professor e aluno cada vez mais dinâmica e atrativa.

2. Ferramentas e Tecnologias Utilizadas

O programa foi desenvolvido através da linguagem de programação Python, que foi utilizada por permitir uma melhor manipulação na área de ciência de dados e aprendizagem de máquina. A interface do sistema foi construída por meio do Framework Streamlit, que possibilita a criação de aplicações web de maneira mais simplificada e interativa para o usuário. Além disso, foi utilizado o Google Generative AI API que permite o uso da IA para

fornecer respostas às perguntas realizadas pelo usuário, sendo acessado através do “GOOGLE_API_KEY”, sendo caracterizada por ser uma credencial que possibilita o uso do programa com os serviços da Google Generative AI .

A implementação da classe denominada “Bot” permite o gerenciamento de documentos de apoio, envio de consultas e o carregamento de respostas que foram solicitadas. O controle do estado de aplicação e histórico das mensagens realizadas pelo indivíduo que está manipulando o programa é feito através do recurso `st.session_state`, ferramenta disponibilizada no Streamlit além de ser um local seguro para armazenar credenciais como a da Google Generative AI.

Entre os recursos usados do Streamlit é feito o uso da sidebar, que possibilita uma melhor organização dos elementos dispostos no programa, tais como a logomarca do projeto “Data Viewer” e as demais informações do mesmo, além de o container representa a área destinada para o diálogo entre usuário e máquina, com o auxílio dos componentes `st.chat_message` e `st.chat_input`, além de usar o recurso `st.spinner` que auxilia na área de feedback visual.

3. Arquitetura do Sistema

A arquitetura do sistema consiste na parte do frontend e backend que são realizados através do Streamlit. O backend é constituído pela classe denominada “Bot”, que possui como principais características o recebimento do da chave da API e todo o gerenciamento dos arquivos quanto o desenvolvimento de respostas baseadas em perguntas desenvolvidas pelo usuário e com base em seu histórico anterior.

O funcionamento do sistema pode ser definido da seguinte maneira:

o usuário digita uma dúvida relacionada a matéria LOP

A pergunta realizada é automaticamente armazenada no `st.session_state` e então direcionada para a classe responsável.

A classe a qual foi direcionada processa a pergunta e realiza a comunicação com a API da Google para que possa sugerir uma resposta consistente ao que foi perguntado.

A resposta obtida através do processo é exibida para o usuário na interface, e todas as perguntas realizadas são armazenadas no histórico para que o discente tenha acesso ao que foi questionado anteriormente.

Todo esse fluxo descrito permite simplicidade, interatividade e escalabilidade que permite ao programa um bom funcionamento, além de permitir futuras expansões do sistema ou adaptação da interface.

O frontend é a composição visual do sistema, sendo definido como uma barra lateral que apresenta dados do projeto responsável pelo seu desenvolvimento e o container principal que exibe todas as interações entre usuário e máquina, semelhante a mensagens de textos que trocamos em nosso cotidiano. Visto que é realizado o armazenamento das perguntas já realizadas a parte principal contém as mensagens inseridas e as respostas obtidas em ordem, estando da mais recente para a primeira mensagem enviada ao bot.

4. Processo de Implementação

O processo de implementação do backend ocorre de maneira progressiva, acontecendo primeiro a definição e desenvolvimento da classe Bot, que recebe uma chave de autenticação da API para então iniciar o carregamento de documentos e disponibilizar respostas, logo após é realizado o histórico de interações do chatbot. Nas próximas etapas se tem a sequência dos passos mencionados anteriormente.

5. Dados de entrada e saída

A operação do sistema desenvolvida acontece por meio da manipulação de dados textuais, sendo assim as entradas de dados são as perguntas e comandos que são realizados pelo discente que realiza o uso do chatbot, que então são recebidos e passam pelo processo de funcionamento do sistema. O resultado do processamento forma a saída dos dados, que também será em dados textuais, e todas elas são armazenadas no histórico da sessão atual e são exibidas ao usuário.

Resultados e Discussões

O recurso educacional, chatbot, permitiu a criação de uma aplicação funcional que é capaz de realizar a integração de uma interface dinâmica e intuitiva com o processamento de respostas geradas por uma inteligência artificial permitindo uma linguagem mais natural e transmitindo o ambiente da sala de aula.

Na figura 1, temos a representação da interface do programa. Analisando visualmente temos a disposição de alguns elementos dentre eles temos uma barra lateral, onde se encontra a identidade visual do projeto e informações do mesmo, já a área principal é destinada para a interação chatbot com o usuário. É possível notar também que a interface preserva algo semelhante aos aplicativos de conversa que utilizamos no cotidiano, possibilitando uma melhor experiência ao usuário preservando a simplicidade, interatividade e a familiaridade com outros sistemas já existentes.

Na figura 2, está presente um fluxograma representando o funcionamento interno do sistema do chatbot. Partindo da etapa iniciar e indo até a etapa de geração de respostas pela IA, evidenciando todo o ciclo de execução que temos a criação de objeto que representa o bot, averiguação do histórico no “session_state”, processamento da mensagem enviada pelo usuário e a etapa final que é a geração de resposta ao discente. Esse ciclo lógico possibilita que todas as funções desejadas no bot sejam executadas de maneira segura e que o estudante retire todas as suas dúvidas e tenha acesso às respostas anteriores.

Diante dos resultados obtidos podemos concluir que o chatbot educacional atingiu alguns objetivos, tais como: experiência dinâmica e interativa, simplicidade no uso, permite ampliação para futuro ajustes e ampliou a relação entre discente e professor através do seu uso. Sendo assim, é uma ferramenta importante para o apoio educacional e para a aprendizagem do aluno na matéria de Lógica de Programação.

Conclusão

A integração entre o frontend e o backend permitiram a construção de um programa simples, atrativo, funcional, dinâmico e que permite ao discente uma interatividade semelhante ao que

ele é exposto no cotidiano, através de uma linguagem natural realizada pela inteligência artificial. Sendo assim, o chatbot educacional pode vir a ser uma solução viável para os desafios encontrados durante o desenvolvimento da matéria Lógica de Programação e para o contexto acadêmico em geral.

Diante dos resultados obtidos temos que o programa pode ser capaz de contribuir para a aprendizagem dentro e fora da sala de aula, já que é ofertado respostas rápidas, respostas condizente com a pergunta realizada, armazenamento do histórico de interações com a máquina, além de possibilitar a autonomia do usuário em sua própria aprendizagem.

Dessa maneira, podemos concluir que o chatbot vai além do seu papel de auxiliar alunos que cursam LOP na UFRN, e representa um exemplo prático de novas tecnologias que fazem o uso de inteligência artificial no auxílio da aprendizagem no ensino superior, possibilitando a redução dos índices de evasão e fortalecer a interatividade entre discente e professor.

Referências

AQUINO, V. H. de Oliveira. Desenvolvimento e aplicações de Chatbot. Revista Teste, Londrina: Unifil, [s.d.]. Disponível em: <<http://periodicos.unifil.br/index.php/Revistateste/article/view/297>>. Acesso em: 18 ago. 2025.

ALYAHYA, Maha; ALSHMRANY, Sultan. The use of chatbots in higher education: A systematic literature review. International Journal of Educational Technology in Higher Education, v. 20, n. 1, p. 1-23, 2023.

Anexos

Figura 2 - Fluxograma do frontend e backend

Figura 1 - layout do chatbot

CÓDIGO: ET0691

AUTOR: CAUÃ MEDEIROS PEREIRA

ORIENTADOR: ORIVALDO VIEIRA DE SANTANA JUNIOR

TÍTULO: Uso de Técnicas de Aprendizado de Máquina para Predição de Desistência de Alunos em Lógica de Programação

Resumo

A evasão estudantil no ensino superior é um problema recorrente que afeta tanto o desenvolvimento da instituição quanto o do aluno. Nesse contexto, esta pesquisa aplicou técnicas de aprendizado de máquina para a predição de desistência de estudantes da disciplina de Lógica de Programação, oferecida pela Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN. Foram utilizados dados de desempenho de listas de exercícios obtidos da plataforma LOP. A partir de testes com diferentes classificadores como Support Vector Machine e Random Forest, os resultados indicaram uma precisão de predição aproximada de 86%, evidenciando uma forte eficiência no processo de classificação. Além disso, a análise de perfis, realizada por meio do algoritmo K-Means, demonstrou a existência de importantes atributos, como a relação entre a terceira lista de exercícios e a permanência dos alunos na disciplina.

Palavras-chave: Aprendizado de máquina. Predição. Evasão. Perfis.

TITLE: Use of Machine Learning Techniques to Predict Student Dropout in Programming Logic

Abstract

Student dropout in higher education is a recurring issue that affects both institutional development and students' academic trajectories. In this context, this research applied machine learning techniques to predict dropout among students enrolled in the Programming Logic course at the School of Science and Technology of UFRN. Performance data were collected from exercise lists available on the LOP platform. Through experiments with different classifiers, such as Support Vector Machine (SVM) and Random Forest, the results indicated a prediction accuracy of approximately 86%, highlighting the efficiency of the classification process. Furthermore, profile analysis conducted using the K-Means algorithm revealed the importance of specific attributes, particularly the relationship between performance in the third exercise list and students' persistence in the course.

Keywords: Machine learning. Prediction. Evasion. Profiles.

Introdução

1. Introdução

A evasão estudantil constitui um dos principais problemas do ensino superior brasileiro, causada, principalmente, pela dificuldade de deslocamento até a universidade, por problemas socioeconômicos e pelas lacunas na formação básica de muitos dos estudantes (LOBO, 2012). Esse fenômeno impacta diretamente tanto as Instituições de Ensino Superior quanto os próprios alunos, mostrando a importância de ações que ajudem a solucionar este problema.

Segundo o Relatório de Gestão da Escola de Ciências e Tecnologia (ECT) (2024), a taxa média de conclusão nos cursos do bacharelado em Ciências e Tecnologia é de 25%, enquanto que a meta estipulada pelo Plano de Desenvolvimento Institucional da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) prevê uma taxa de 62%. No mesmo documento, destaca-se a existência do projeto Taxa de Sucesso, cujo propósito é elevar os percentuais de permanência e conclusão, favorecendo o desenvolvimento acadêmico dos estudantes ao longo da graduação. Nesse cenário, o uso de ferramentas que auxiliem na identificação precoce de possíveis desistências, identificando os alunos em situação de vulnerabilidade de forma rápida e eficiente, se tornam de extrema importância.

Com o avanço cada vez maior das inteligências artificiais, algoritmos que utilizam técnicas de aprendizado de máquina para prever acontecimentos recebem destaque. A pesquisa realizada por Oliveira (2023) mostra o uso prático de algoritmos como árvore de decisão e floresta aleatória para a detecção de alunos com tendência à evasão, a partir de dados obtidos pela autoavaliação dos cursos de graduação da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Dessa forma, a presente pesquisa possui como objetivo principal a predição de evasão e análise de perfis dos alunos da disciplina de Lógica de Programação, no âmbito da ECT, unidade acadêmica especializada da UFRN. O treinamento do algoritmo foi realizado com dados extraídos da plataforma LOP (VILELA NETO et al., 2020), possibilitando a avaliação de atributos relacionados ao desempenho do aluno, como: a rapidez na execução das atividades, a quantidade de respostas corretas, entre outros fatores.

Para a pesquisa, foi considerada uma análise empírica dos docentes da disciplina, que observaram maior tendência de desistência entre os alunos que não concluíram todas as listas de exercícios propostas. Com base nessa relação, neste trabalho, o estudante classificado como desistente é aquele que deixa de submeter as três últimas listas de exercícios. O propósito, além de caracterizar os perfis, é prever alunos com indícios de evasão já a partir da terceira semana de aula, período correspondente à realização das três primeiras listas de exercícios, permitindo intervenções rápidas e eficazes que favoreçam o desenvolvimento do discente antes que o abandono aconteça.

Metodologia

2. Metodologia

Para a estruturação do trabalho, a fim de obter uma maior organização desde o processo de testes até o resultado final, foi utilizada a metodologia CRISP-DM (sigla

para Cross Industry Standard Process for Data Mining, ou em português, Processo Padrão de Vários Segmentos de Mercados para Mineração de Dados). Ela consiste em um conjunto de etapas não lineares divididas em: entendimento do negócio, entendimento dos dados, preparação dos dados, modelagem, avaliação e implantação (SHEARER, 2000).

Apesar de ser criada, inicialmente, como um modelo de processo voltado para mineração de dados e negócios, essa metodologia possibilita uma grande flexibilidade quanto a ajustes em sua estrutura (IBM, 2025). Diante disso, para o projeto, as etapas seguidas foram: entendimento dos dados, preparação dos dados, treinamento e avaliação dos resultados.

2.1. Entendimento dos dados

Antes de iniciar as etapas de preparação e treinamento, foi necessário compreender a origem e a estrutura do conjunto de dados. Para este projeto, foram utilizados os dados de desempenho dos alunos extraídos da plataforma LOP, uma ferramenta de ensino para disciplinas de lógica de programação.

A Figura 1 ilustra o processo de extração dos dados realizado pela equipe de banco de dados do projeto Dataviewer, no qual foram gerados arquivos no formato .csv com informações detalhadas sobre o desempenho dos estudantes. Durante a pesquisa, os arquivos originais foram ajustados e novos atributos foram criados, visando enriquecer a base e possibilitar melhores resultados no treinamento dos modelos.

O conjunto final foi composto pelas listas 1, 2 e 3, referentes às três primeiras semanas da disciplina, e pelas listas 13, 14 e 15, que representam o final do curso. Assim, os atributos presentes no arquivo .csv estão descritos na Tabela 1.

É importante destacar que os atributos se repetem para cada lista, seguindo um padrão de nomenclatura na qual é inserido o número da lista ao final de cada variável. Ao total, o conjunto de dados foi formado por 879 instâncias e 41 atributos, referentes a todas as turmas de lógica de programação da ECT, no ano de 2022.

2.2 Preparação dos dados

A preparação dos dados é uma etapa essencial para a obtenção de resultados consistentes durante o treinamento dos modelos, levando em consideração que os arquivos extraídos da plataforma LOP continham ruídos e inconsistências capazes de comprometer o desempenho dos classificadores.

O processo foi realizado em Python, utilizando as bibliotecas NumPy e Pandas, comumente aplicadas em tarefas de manipulação e limpeza de dados. Assim, inicialmente, foram removidas as linhas com valores ausentes, considerados potencialmente prejudiciais ao treinamento.

Os dados também passaram por um processo de remoção de outliers. Para isso, aplicou-se o método K-Means para identificar três perfis principais, seguido pela

visualização em espaço reduzido via t-SNE. A partir disso, os pontos que se mostraram significativamente distantes dos agrupamentos foram considerados anômalos e, em seguida, excluídos.

Outro passo importante foi o balanceamento das classes, realizado por meio da técnica de undersampling, que reduz a quantidade de instâncias da classe majoritária (IMBALANCED-LEARN, 2025). Essa estratégia permitiu obter resultados mais equilibrados, principalmente quando analisadas as matrizes de confusão.

Em seguida, realizou-se a seleção de atributos com base em uma matriz de correlação, a qual possibilitou identificar visualmente as variáveis de maior relação com a variável-alvo. Apenas esses atributos foram utilizados no treinamento dos modelos, garantindo melhores resultados e diminuindo o ruído.

Por último, sabendo que os atributos apresentaram diferentes escalas, aplicou-se o processo de normalização dos valores, ajustando-os para a escala de 0 a 1. Essa etapa foi realizada visando fazer com que as variáveis tenham o mesmo peso relativo durante a classificação.

2.3. Treinamento

A etapa de treinamento foi realizada utilizando diferentes algoritmos de classificação, a fim de comparar o desempenho obtido e identificar o melhor para a predição da evasão. Diante disso, foram testados os classificadores: Support Vector Machine (SVM), Árvore de Decisão, Random Forest, Gaussian Naive Bayes e XGBoost.

O processo foi realizado em duas diferentes etapas: treinamento e teste, com o objetivo de avaliar não apenas a capacidade de decorar padrões, mas a eficiência real dos modelos na predição de valores não vistos. Assim, o conjunto de dados foi separado em 75% para treinamento e 25% para teste, na qual os atributos utilizados foram: "submissions_list", "HitsCorrects_list", "submissions_mean_list", "Submissions_Corrects_list", "Percentage_hit_list", "submitted_list", das listas 1, 2 e 3. Já a classe alvo que obteve os melhores resultados foi "submitted_list13".

Além disso, buscando otimizar ainda mais os resultados, aplicou-se a ferramenta GridSeachCV, a qual testou diferentes combinações de parâmetros dos classificadores. Ao final, foram aplicados nos modelos os parâmetros que obtiveram as melhores métricas.

Já para a obtenção dos perfis, aplicou-se o treinamento não supervisionado de clusterização por meio do K-Means.

2.4. Avaliação dos resultados

A avaliação dos resultados obtidos pelos classificadores foi realizada por meio de métricas disponibilizadas na biblioteca Scikit-learn. Assim, foram aplicados as seguintes medidas: Acurácia, a qual mede o percentual de previsões corretas em relação ao total; Precisão, que indica a capacidade do modelo de classificar um

resultado corretamente; Recall, a qual se refere a capacidade de classificar os resultados positivos em relação ao total de classes positivas; e F1-Score, que representa a média entre a precisão e o recall (SCIKIT-LEARN, 2025).

Também foi aplicada uma avaliação visual por meio da análise da matriz de confusão, permitindo verificar se os resultados estavam balanceados e possíveis erros.

Resultados e Discussões

3. Resultados e Discussão

Os resultados da pesquisa foram organizados de acordo com os objetivos de cada etapa da metodologia. Assim, serão apresentados a seguir as informações obtidas relacionados ao processo de limpeza dos dados, à classificação e à identificação de perfis de alunos.

3.1. Análise do Processo de Limpeza dos Dados

Durante a etapa de limpeza dos dados, foram obtidos resultados de grande relevância analítica, fundamentais para o bom desempenho posterior dos classificadores. Na aplicação do t-SNE, utilizado para a redução da dimensionalidade para duas dimensões, como mostra a Figura 2, foi possível identificar três outliers principais, posicionados a uma distância considerável do conjunto de dados agrupados. Esses pontos foram removidos com o objetivo de aprimorar a qualidade da base e, conseqüentemente, melhorar a capacidade de classificação.

Nesta etapa também foi realizada a seleção dos atributos utilizados no treinamento. Para isso, foi gerada uma matriz de correlação envolvendo todos os atributos e seus respectivos coeficientes de correlação. A partir dessa análise, foram mantidas apenas as variáveis com maior grau de correlação. A Figura 3 apresenta os atributos que demonstraram melhor desempenho de correlação em relação às listas 13, 14 e 15.

Vale ressaltar que também foram considerados os testes e métricas dos classificadores para escolha dos atributos, fazendo com que o indicador de submissão da lista 13 ("submitted_list13") fosse utilizado como classe principal para o treinamento.

3.2 Desempenho dos Classificadores

Após o ajuste dos hiperparâmetros dos classificadores por meio da ferramenta GridSearchCV, os modelos foram aplicados e avaliados com a divisão realizada em treinamento e teste. Vale ressaltar que os atributos utilizados corresponderam aos com maior correlação com a variável-alvo, conforme discutido anteriormente. Já a classe alvo definida foi o indicador que representa se o aluno submeteu ou não a lista 13, permitindo prever a não realização dessa atividade e, conseqüentemente, a

possível desistência da disciplina. As métricas obtidas para cada modelo estão apresentadas na Tabela 2.

Ao analisar os resultados percebemos que, apesar de terem sido utilizados hiperparâmetros específicos em cada um dos classificadores, as métricas obtidas convergiram para valores em comum, principalmente nos casos da Árvore de Decisão, Random Forest e XGBoost. Apesar do XGBoost ser um modelo mais recente, os resultados mostraram que sua complexidade não trouxe ganhos significativos, em comparação aos outros classificadores. No geral, a acurácia foi maior do que 90% em todos os casos, o que mostra o sucesso no balanceamento e pré-processamento dos dados, os quais possibilitaram a formação de um conjunto de dados estruturado.

Dentre as métricas obtidas, o modelo Naive Bayes obteve o melhor resultado de recall (98,78%), mas como uma menor precisão (85,26%). Este fator demonstra que o classificador foi eficiente na previsão de classes positivas, mas apresentou maior dificuldade em distinguir os negativos. Na Figura 4, que representa a matriz de confusão do treinamento, essa tendência fica evidente, ao verificar que os falsos positivos são maioria nos erros.

É importante ressaltar que, no contexto de previsão de evasão, os falsos positivos representam um problema mais crítico, pois significam que alunos com risco de desistência não seriam detectados pelo algoritmo. Já os falsos negativos, desde que ocorram com baixa frequência, possuem impacto menos prejudicial, uma vez que apenas resultam em intervenções adicionais para alunos que, provavelmente, permaneceriam. Foi por esse motivo que houve a realização de procedimentos de preparação e balanceamento dos dados, voltados a minimizar erros no momento da classificação.

Dentre os modelos avaliados, o que apresentou melhor equilíbrio entre as métricas de desempenho foi o SVM, que obteve bons índices de acurácia, precisão, recall e F1-Score. Além disso, sua matriz de confusão, apresentada na Figura 5, foi mais balanceada que a dos demais classificadores, mostrando sua eficiência para o objetivo principal da pesquisa.

É a partir do modelo treinado que o algoritmo poderá ser implementado em uma plataforma, estando pronto para realizar a previsão de possíveis desistências dos alunos, com outros conjuntos de dados, desde que possuam os mesmos atributos de entrada.

3.3 Análise dos Perfis dos Alunos

No processo de criação dos perfis, os atributos escolhidos para o treinamento não supervisionado foram diferentes dos empregados para os classificadores supervisionados. A seleção dessas variáveis foi realizada a partir do treinamento de uma Árvore de Decisão, configurada com profundidade máxima de três níveis. Como variável-alvo, adotou-se o indicador de submissão da lista 15, de modo a identificar os atributos mais relevantes para a segmentação dos estudantes. A árvore obtida é apresentada na Figura 6.

A partir do treinamento, foram identificados quatro atributos com maior índices de importância para divisão dos dados, sendo eles: “Submissions_Corrects_list03”, “submissions_mean_list01”, “TimeAll_lits03” e “TimeMean_list02”. A relevância de cada variável na divisão dos dados pode ser visualizada na Figura 7.

Com base nesses atributos, o conjunto de dados foi dividido e realizado o treinamento dos perfis dos alunos por meio do K-Means. A definição do número de perfis foi feita com apoio do método do cotovelo, cujo gráfico de erro está apresentado na Figura 8.

A partir da análise, definiu-se que três perfis representavam de forma eficiente a estrutura dos dados, sendo o equilíbrio entre a menor quantidade de perfis e uma menor taxa de erro. O resultado dos perfis obtidos com a clusterização pode ser visualizado na Figura 9.

A partir da análise dos gráficos, percebemos a divisão evidente de cada um dos perfis. O perfil 1, composto por 387 alunos, é caracterizado pela alta quantidade de submissões corretas e tempo total para a realização da lista 3 elevado. O perfil 2, que possui 113 alunos, apresenta comportamento semelhante ao perfil 1, com elevado número de submissões corretas, porém com menor tempo total para resolução da lista. Por último, o perfil 3, formado por 379 estudantes, possui ausência de valores em todos os atributos selecionados, representando possivelmente os estudantes em situação mais crítica e, portanto, que demandam maior atenção.

Quando visualizamos a probabilidade de aprovação dos alunos por perfil (Figura 10), ou seja, a probabilidade do aluno realizar a submissão na última lista de exercícios da disciplina, fica evidente que o perfil 3 é o que necessita de maior atenção. Esse fator é indicado pelo fato de 97,4% dos alunos que compõem o perfil possuírem probabilidade de desistência.

Outro aspecto relevante foi a forte associação entre a variável “Submissions_Corrects_list03” e a probabilidade de aprovação. Esse resultado pode ser explicado pela maior complexidade da lista 3 em relação às anteriores. Assim, pode ser suposto que estudantes que conseguem realizar essa atividade com sucesso no início da disciplina tendem a demonstrar maior persistência e probabilidade de conclusão.

Conclusão

4. Conclusão

Esta pesquisa conseguiu atingir o seu objetivo principal de desenvolver métodos por meio de aprendizado de máquina para a predição de desistência dos alunos de Lógica de Programação, da ECT. Os resultados dos classificadores mostraram índices de desempenho satisfatórios, com precisão aproximada de 86%, o que mostra a eficiência do pré-processamento dos dados e dos modelos utilizados. Por meio dos resultados obtidos, será possível implementar os algoritmos em dados de

semestres seguintes, auxiliando na detecção com antecedência dos alunos que precisam de maior apoio para continuar no curso e, dessa forma, propor ações que ajudem na sua permanência.

Além disso, os experimentos possibilitaram a identificação de atributos mais relevantes para a análise do desempenho dos alunos, os quais devem ser monitorados de forma contínua. Por meio de conversas com docentes da disciplina, foi visto que a lista 3 realmente apresenta uma maior carga de complexidade, de forma que medidas podem ser tomadas a fim de melhorar o processo de aprendizagem dos alunos.

Este trabalho também se configura como um ponto de partida para análises futuras de maior complexidade. A adição de dados socioeconômicos e informações referentes ao desempenho em outras disciplinas podem aumentar a abrangência dos modelos de predição. Dessa forma, os classificadores poderão ser adaptados a diferentes contextos e conjuntos de dados, reforçando sua aplicabilidade.

Por fim, ao explorar tecnologias com grande potencial de identificar padrões de desempenho, este estudo contribui não apenas para a instituição, mas também para o desenvolvimento dos alunos, auxiliando iniciativas de apoio à permanência escolar.

Referências

IBM. **Visão Geral de Ajuda do CRISP-DM**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.ibm.com/docs/pt-br/spss-modeler/18.5.0?topic=dm-crisp-help-overview>. Acesso em: 17 ago. 2025.

IMBALANCED-LEARN. **Undersampling techniques**. [S. l.], 2025. Disponível em: https://imbalanced-learn.org/stable/under_sampling.html. Acesso em: 23 ago. 2025.

LOBO, M. B. C. M. Panorama da evasão no ensino superior brasileiro: aspectos gerais das causas e soluções. Brasília, DF: Associação Brasileira de Mantenedoras de Ensino Superior, 2012. (Cadernos, v. 25).

SCIKIT-LEARN. **Model evaluation: quantifying the quality of predictions**. [S. l.], 2025. Disponível em: https://scikit-learn.org/stable/modules/model_evaluation.html. Acesso em: 23 ago. 2025.

SHEARER, C. The CRISP-DM model: the new blueprint for data mining. **Journal of Data Warehousing**, v. 5, n. 4, 2000.

OLIVEIRA, Ronei dos Santos. **Modelo de predição de evasão escolar com base em dados de autoavaliação de cursos de graduação**. 2023. 73 f.. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Informação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus João Pessoa, João Pessoa, 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. Escola de Ciências e Tecnologia. Relatório de gestão 2024. Natal: UFRN/ECT, 2024. Disponível em: <https://www.ect.ufrn.br/documentos/relatorios-de-gestao-da-escola-de-ciencias-e-tecnologia/>. Acesso em: 23 ago. 2025.

VILELA NETO, Francisco de Assis; SILVA, Diogo Vinícius de Paulo da; PAZ, Hewerton Adão da; SILVA, Igor Rosberg de Medeiros; SANTANA JR., Orivaldo Vieira de. Sistema LOP: uma ferramenta para avaliação contínua em programação de computadores. In: ENCONTRO INTEGRADO DOS PROGRAMAS DE ENSINO, 2020, Natal. Anais [...]. Natal: UFRN, 2020.

Anexos

Figura 1 – Processo de extração dos dados

Tabela 1 – Atributos do conjunto de dados extraído da plataforma LOP

Figura 2 – Visualização de Outliers Utilizando o t-SNE

Figura 3 – Matriz de Correlação dos Atributos do Conjunto de Dados

Tabela 2 – Métricas Obtidas Após Treinamento e Validação

Figura 4 – Matriz de Confusão do Modelo Naive Bayes

Figura 5 – Matriz de Confusão do Modelo SVM

Figura 6 – Árvore de Decisão Obtida Para Melhores Atributos

Figura 7 – Atributos com Maior Relevância para Árvore de Decisão

Figura 8 – Gráfico Representativo do Método do Cotovelo

Figura 9 – Perfis Obtidos Após Clusterização

Figura 10 – Proporção de Alunos Aprovados por Perfil

CÓDIGO: ET0729

AUTOR: VITORIA KATHERINE DO NASCIMENTO

ORIENTADOR: CAMILA PACELLY BRANDÃO DE ARAÚJO

TÍTULO: Obtenção de nitreto de tungstênio m reator de leito fixo

Resumo

A utilização dos elementos de transição da 4d (Mo, Nb e Zr) vem crescendo ao decorrer do tempo por possuir características como boa condutividade térmica, elevada resistência mecânica e dureza e capacidade de formar ligas estáveis e resistentes à corrosão. Um dos métodos comuns envolve reações químicas em fase gasosa: CVD (Chemical Vapor Deposition) que é uma técnica na qual um material sólido é depositado sobre um substrato por meio de reações químicas de compostos na fase gasosa e o MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition), que é uma variante do CVD que usa compostos metalorgânicos, contendo ligação metal-carbono, como precursores, permitindo deposições em temperaturas mais baixas e com melhor controle da composição. Em vista disso, este trabalho teve como objetivo principal estudar a obtenção de nitretos de tungstênio pela metodologia de reação gás-sólido usando como fonte gasosa o nitrogênio ou a amônia e avaliar o êxito das mudanças nas condições de processo sobre a obtenção da fase cristalina de nitreto de tungstênio e demais características do pó.

Palavras-chave: Nitreto de Tungstênio. CVD. MOCVD. Reação gás-sólido. Amônia

TITLE: Synthesis of Tungsten Nitride in a Fixed-Bed Reactor

Abstract

Transition metals from the 4d series (Mo, Nb, Zr) are increasingly utilized due to their excellent thermal conductivity, mechanical strength, and ability to form stable, corrosion-resistant alloys. Among synthesis techniques, Chemical Vapor Deposition (CVD) and its variant Metal-Organic CVD (MOCVD) are widely employed for thin-film deposition. This study focuses on synthesizing tungsten nitride (WN_x) through a gas-solid reaction in a fixed-bed reactor, using nitrogen (N_2) or ammonia (NH_3) as gaseous precursors. The effects of process parameters (temperature, gas flow rate, and reaction time) on the crystalline phase formation and powder characteristics were systematically evaluated. The results demonstrate the feasibility of this method for producing tungsten nitride with potential applications in wear- and corrosion-resistant coatings.

Keywords: Tungsten nitride. CVD. MOCVD. Gas-solid reaction. Ammonia

Introdução

A crescente demanda por materiais inovadores que possuam propriedades anticorrosivas, térmicas e mecânicas notáveis tem incentivado a pesquisa em nitretos de metais de transição, em especial o nitreto de tungstênio por possuir características como dureza elevada, comparável a outros revestimentos cerâmicos e isso endossa a durabilidade de componentes expostos a atrito e ambientes severos, como turbinas e motores de geração térmica ou renovável. Além disso, suas aplicações englobam desde o armazenamento de energia até revestimentos protetores, sendo visado por permitir a adoção de energia limpa e práticas industriais sustentáveis. Nesse contexto, destaca-se também o potencial aplicação do nitreto de tungstênio como material catalítico para reações de hidrogenação de compostos orgânicos, uma rota tecnologicamente promissora para permitir o transporte seguro e eficiente de hidrogênio, um dos grandes desafios para a consolidação de uma economia de baixo carbono.

Assim como observado para os carbetos (Oyama, 1992), os nitretos de metais de transição, WN_x e MoN_x , evidenciam a atividade catalítica competitiva em relação a metais nobres, com vantagens como resistência ao envenenamento por CO e enxofre (Jaggers et al., 1990) e aplicabilidade em reações de eletrocatalise (Cheng et al., 2019; Liu et al., 2016). Essa concordância entre desempenho e estabilidade dispõe os nitretos como alternativas sustentáveis em processos industriais. Este perfil catalítico robusto abre perspectivas para o uso do WN_x em processos de hidrogenação, etapa crucial na transformação de vetores energéticos para o transporte de H_2 .

Por conseguinte, esse estudo investiga a síntese de nitreto de tungstênio por meio de uma reação gás-sólido em reator de leito fixo, utilizando nitrogênio (N_2) ou amônia (NH_3) como precursores gasosos. O reator de leito fixo oferece vantagens distintas, como menor consumo energético em comparação com métodos tradicionais de Deposição Química em Fase Vapor (CVD), redução na geração de resíduos e controle preciso das condições reacionais — princípios fundamentais da química verde. Ao evitar precursores metalorgânicos tóxicos (comuns no MOCVD), esta abordagem prioriza a segurança ambiental sem comprometer o desempenho do material. A natureza inovadora desta pesquisa reside na combinação estratégica de um precursor reativo (paratungstato de amônia) com um processo termicamente eficiente, buscando obter WN_x com propriedades catalíticas controladas. O caráter desafiador está em dominar os parâmetros de síntese para obter uma fase de nitretação com a estequiometria, área superficial e sítios ativos adequados para aplicações em catálise, notadamente em reações de hidrogenação.

Ademais, este trabalho está intrinsecamente alinhado ao ODS 7, ao falar a respeito da sua possível utilização revestimentos duráveis para sistemas de energia renovável, e também como material habilitador para tecnologias de hidrogênio ao ODS 9 através de métodos de produção aplicável em com um percentual mais baixo de poluentes, e ao ODS 13 ao minimizar a pegada de carbono. Portanto, o uso de nitrogênio (N_2) ou amônia (NH_3) como alternativas a precursores convencionais sintetiza a transição para a utilização da química sustentável, gerando um modelo mais ecoeficiente de materiais avançados para a transição energética.

Metodologia

O presente trabalho adotou uma abordagem experimental sistemática para avaliar a síntese de nitreto de tungstênio (WN_x) a partir do precursor paratungstato de amônia tetra-hidratado $((NH_4)_{10}[H_2W_{12}O_{42}] \cdot 5H_2O)$, em reator de leito fixo, estudando minuciosamente os parâmetros reacionais que condicionam as propriedades dos materiais e a sua formação. Como precursor sólido de tungstênio, foi utilizado paratungstato de amônio pentahidratado (Sigma-Aldrich, grau de pureza $\geq 99\%$), de fórmula $(NH_4)_{10}[H_2W_{12}O_{42}] \cdot 5H_2O$. Os gases utilizados para a atmosfera reacional foram N_2 (Nitrogênio, White Martins, 99,998%) e NH_3 (Amônia, White Martins, 99,999%).

O procedimento experimental consistiu em:

- Preparação da Carga: Uma massa definida do precursor sólido foi colocada em um cadinho de alumina, o qual foi posicionado na zona isotérmica de um forno tubular de quartzo.
- Purga do Sistema: O reator foi selado e submetido a três ciclos de purga com fluxo de N_2 para garantir uma atmosfera inerte e remover traços de oxigênio.
- Termólise e Nitretação: O sistema foi aquecido até a temperatura de reação definida (entre 600 e 800 °C), sob uma taxa de aquecimento controlada (1-10 °C/min), sob fluxo contínuo da mistura gasosa reacional (N_2 , NH_3 ou uma combinação de ambos, com vazões entre 5 e 30 L/h).
- Resfriamento e Coleta: Após o tempo de reação, o forno foi desligado e a amostra foi resfriada até temperatura ambiente sob fluxo de N_2 para evitar oxidação do produto. O material sólido resultante foi então coletado para caracterização.

2.1 PARÂMETROS OPERACIONAIS E CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

- O estudo permitiu a investigação de cinco principais fatores:
- Zona de temperatura de reação (600 - 800 °C)
- Taxas de aquecimento (1 -10°C/ min)
- Vazão da mistura gasosa (5-30 L/h)
- Composição do gás reacional (razões N_2/NH_3 variáveis)
- Massa de pó de tungstênio inicial (0,5 - 3,0 g)

2.2 BASES CIENTÍFICAS PARA CONDIÇÕES INICIAIS

- As condições iniciais do experimento foram fundamentadas em:
- Trabalhos atualizados sobre a síntese de nitretos (Silva et al., 2023)
- Estudos clássicos de cinética de nitretação (Medeiros et al., 2002)
- Princípios termodinâmicos de formação de nitretos.

- Estudo e análise dos parâmetros de síntese de NbN e TaN via reação gás-sólido. (Silva, Rayane. 2023)

2.3 METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO

- A investigação dos produtos obtidos foi realizada através de:
- DRX (Difração de Raios X): Para identificação das fases cristalinas presentes e determinação da pureza do WN_x ;
- Refinamento Rietveld: Quantificação das fases e análise estrutural detalhada;
- MEV/EDS (Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva): Avaliação morfológica e análise elementar.

2.4 ANÁLISE DE DADOS

Os resultados serão avaliados através da análise do DRX.

Resultados e Discussões

A Análise por Difração de Raios-X permitiu inferir que inicialmente, a utilização do paratungstato de amônia que é um sal complexo e se decompõe em temperaturas baixas e facilita a redução e nitretação pelos gases se comparado ao WO_3 comercial por ser um óxido estável e com pequena área superficial, mostrou como a sua escolha foi estratégica.

A caracterização estrutural dos catalisadores foi realizada por difração de raios X (DRX), com o intuito de identificar as fases cristalinas presentes e avaliar sua pureza. Os difratogramas obtidos, apresentados nas Figuras 1, 2 e 3, evidenciaram uma nítida evolução das fases cristalinas em função da temperatura, com os picos de difração indexados de acordo com os arquivos de referência da base de dados JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

A evolução microestrutural e a necessidade de controle preciso dos parâmetros de síntese ficaram evidentes: Na amostra tratada a 600 °C, o padrão de difração foi indexado principalmente à fase WO_2 monoclinica, JCPDS nº 00-032-1393, grupo espacial $P2_1/n$ (nº 14) e à fase O_3 ortorrômbica, JCPDS nº 00-020-1324, grupo espacial P/E . Os picos amplos e de baixa intensidade indicam uma cristalinidade incipiente e tamanho de cristalito nanométrico, condizente com os estágios iniciais de decomposição do precursor e nucleação de novas fases. Na amostra tratada a 700 °C, observa-se uma transição de fase foi identificada a fase $W_{2.00}$ de estrutura cúbica, JCPDS nº 96-900-8559, grupo espacial $Im-3m$ (nº 229), também acompanhada pela fase WO_3 monoclinica, JCPDS nº 01-088-0545, grupo espacial Pc (nº 7), indicando que a nitretação ainda não foi completa e que parâmetros como tempo de residência nesta temperatura poderiam ser otimizados para promover a conversão total. A amostra tratada a 800 °C indicaram nos difratogramas a predominância de tungstênio metálico (W) com estrutura cúbica, JCPDS nº 01-089-3012, grupo espacial $Im-3m$ (nº 229), coexistindo com a fase WO_3 monoclinica, JCPDS nº 01-088-0545, grupo espacial Pc (nº 7), este resultado é crucial: ele

demonstra que a temperatura de 800°C, embora adequada para a cristalização, foi excessiva para a estabilidade do nitreto sob as condições atmosféricas utilizadas, levando à sua decomposição parcial em tungstênio metálico.

Além disso, nos resultados do DRX (Figuras 1, 2 e 3) esclareceram uma transição da fase em função da temperatura, no qual, a 600°C (Figura 1), o difratograma mostrou que na etapa inicial da decomposição térmica do paratungstato, houve um perfil amorfo e com baixa intensidade e a liberação de água de amônia e cristalização. Comportamento similar ao observado por Silva (2017) para o precursor oxálico de nióbio, onde este apresentou cristalinidade baixa nos estágios iniciais. Na temperatura de 700°C, observa-se transição de fase marcante. Os picos de difração broad (largos) nas posições angulares (2θ) de aproximadamente 37,5° e 43,5°, correspondentes aos planos (111) e (200) da fase cúbica de W_2N , sinalizam a formação bem-sucedida da fase nitretada alvo. No qual, analisa-se que os picos sugerem a formação de nanocristais condizentes com o crescimento inicial da fase nitretada e da nucleação.

O ponto culminante da evolução cristalina foi o atingido a 800°C (Figura 3). O difratograma mostrou picos intensos, definidos e estreitos, afirmando um aumento significativo no tamanho do cristalito e na pureza da fase. A completa nitretação a 800°C contrasta claramente com os resultados reportados por Silva (2017) para a síntese de NbN. Isto evidencia a crítica necessidade de ajuste fino dos parâmetros, sugerindo que a obtenção de WN_x puro e estável requereria não apenas o controle da temperatura máxima, mas possivelmente o uso de atmosferas mais redutoras, tempos de reação mais curtos nesta temperatura ou até mesmo a adoção de uma temperatura isotérmica final ligeiramente inferior, seguida de um resfriamento controlado para preservar a fase nitretada. A partir de Nb_2O_5 comercial, mesmo ele a 900°C resultou apenas da formação de NbO_2 , necessitando de 1100°C para a obtenção de NbN puro. Por conseguinte, pode-se acentuar isso a maior reatividade intrínseca do precursor, pois a decomposição do paratungstato gera óxidos de tungstênio sub estequiométricos (WO_{3-x}) ou o tungstênio metálico que possui alta porosidade, área superficial alta. Outro fator que é importante ressaltar é o efeito catalítico, pois durante o processo de decomposição térmica, o paratungstato libera amônia (NH_3), e essa amônia age como um agente de nitretação adicional e muito eficiente no seu leito reacional, acelerando o processo.

Ademais, isso infere que a eficiência do processo é uma junção de temperatura, um precursor molecular complexo e a condição de um ambiente reativo favorável. Entretanto, a evolução das fases e do tamanho de cristalito de amórfico/nanocristalino a bem cristalizado e a decomposição observada a 800°C comprovam que a otimização do protocolo é fundamental. A janela de processo para obtenção da fase pura de nitreto de tungstênio é estreita e sensível a parâmetros como temperatura final, taxa de aquecimento, tempo de patamar e atmosfera gasosa. O método mostrou-se promissor, mas os resultados indicam que a fase nitretada de tungstênio com cristalinidade excelente pode ser alcançada de forma estável apenas com um controle mais rigoroso das variáveis de processo, notadamente a utilização de um tempo de residência mais curto na temperatura máxima para evitar a decomposição.

O método mostrou-se tão eficaz que a fase nitretada de tungstênio foi alcançada com cristalinidade excelente a uma temperatura 300°C menor do que a necessária para o nióbio usando precursores tradicionais. Isso pressupõe avanços diretos para a economia de energia e o estudo da viabilidade industrial do processo, mas demanda investigações futuras focadas no ajuste fino desses parâmetros.

Os resultados comprova com sucesso que a seleção criteriosa de precursores avançados, como o usado neste trabalho, o paratungstato de amônia, pode restabelecer as janelas de processo para a síntese de nitretos metálicos, possibilitando mais opções de obtenção de materiais de alta qualidade em condições menos severas e mais sustentáveis energeticamente. Servindo de mais estudos futuros que focarão na otimização dos parâmetros para controlar a estequiometria específica do o mononitreto de tungstênio para o o ditungstênio mononitreto e na avaliação das propriedades catalíticas do material que foi obtido no mecanismo resultante.

Conclusão

O estudo da obtenção de nitreto de tungstênio em reator de leito fixo demonstrou com sucesso a viabilidade da síntese de nitreto de tungstênio (WN_x) por meio do método de reação gás-sólido, usando uma opção mais sustentável e inovadora. A análise sistemática dos parâmetros: composição, temperatura e vazão da mistura gasosa permitiram otimizações para a obtenção de um material de alta qualidade.

Os resultados do DRX relacionam a cristalinidade e a pureza de fase com a temperatura da reação. Quando a temperatura do material estava a 600°C, ele apresentou uma característica amorfa, enaltecido na etapa inicial, já na temperatura a 800°C observou-se fortemente a presença de nitreto de tungstênio cristalizado, com índices notáveis de pureza. Isso pode mostrar que o desempenho do material foi alcançado a uma temperatura mais baixa do que o mostrado na literatura para nitretos de nióbio, isso está diretamente relacionado à escolha do precursor, paratungstato de amônia tetrahidratado e suas boas propriedades químicas.

Por conseguinte, este trabalho fornece um maior entendimento sobre a relação entre a natureza do precursor, a cinética de formação de nitretos e os parâmetros termodinâmicos. E isso infere que além de fornecer um protocolo reprodutível e eficiente para a síntese de WN_x , este material possui alta capacidade de ser usado em eletrocatalise, catálise heterogênea e revestimentos de proteção. Por fim, o trabalho enfatiza a importância do desenho reacional dos precursores como estratégia crucial para a obtenção de materiais funcionais que otimizem as dinâmicas econômicas e ambientais.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, foram propostas as seguintes investigações:

Controle de estequiometria e otimização para averiguar de uma forma mais abrangente a influência do tempo de residência e a taxa de aquecimento na

isoterma para o controle de vazão e avaliar o impacto na condutividade elétrica e na atividade catalítica.

Analisar a cinética e modelagem do processo através do desenho cinético que possam verificar a fundo as etapas de decomposição do precursor, nitretação e redução com a finalidade de obter de forma mais assertiva as energias de ativação e os mecanismos reacionais.

Estudos de viabilidade econômica e realizações de testes de síntese em escala piloto para averiguar a reprodutibilidade e o custo benefício do processo em larga escala, podendo se tornar um aliado muito útil nas atividades ambientais.

Referências

- ATKINS, Peter; PAULA, Júlio de. Físico-Química: Fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- CHENG, Y. et al. Tungsten nitride nanocrystals on nitrogen-doped carbon black as efficient electrocatalysts for oxygen reduction. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 11, n. 3, p. 3156-3165, 2019.
- JAGGERS, C. H. et al. Characterization of molybdenum nitrides for thiophene hydrodesulfurization. *Journal of Catalysis*, v. 126, n. 1, p. 339-351, 1990.
- LIU, X. et al. Transition metal nitrides for electrocatalytic energy conversion: Opportunities and challenges. *ChemSusChem*, v. 9, n. 12, p. 1310-1317, 2016.
- MEDEIROS, F. F. P. Síntese de carbetos de tungstênio e nióbio a baixa temperatura, através de reação gás-sólido em reator de leito fixo. 2002. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.
- OYAMA, S. T. Preparation and catalytic properties of transition metal carbides and nitrides. *Catalysis Today*, v. 15, n. 2, p. 179-200, 1992.
- SILVA, Rayane Ricardo da. Análise dos parâmetros de síntese de NbN via reação gás-sólido. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- SILVA, R. R. et al. Avances en la síntesis de nitruros de metales de transición mediante reacción gas-sólido: una revisión. *Journal of Advanced Materials Research*, v. 12, n. 4, p. 45-62, 2023.

Anexos

Figura 1 – Difratoograma de raios X da amostra tratada a 600 °C com identificação das fases cristalinas segundo fichas JCPDS (00-032-1393) e (00-020-1324).

Figura 2 – Difratoograma de raios X da amostra tratada a 700 °C com identificação das fases cristalinas segundo fichas JCPDS (96-900-8559) e (01-088-0545).

Figura 3 – Difratoograma de raios X da amostra tratada a 800 °C com identificação das fases cristalinas segundo fichas JCPDS (01-089-3012) e (01-088-0545).

CÓDIGO: ET0866

AUTOR: PEDRO HENRIQUE DA SILVA PAIXAO

ORIENTADOR: EVERTON SANTI

TÍTULO: Modelagem, Implementação e Validação de Modelos para o Problema
University Course Timetabling

Resumo

O problema de TimeTabling (TT) consiste na alocação de eventos em horários e espaços físicos respeitando restrições pré-estabelecidas, sendo classificado como NP-Completo. Este trabalho propõe um modelo de Programação Linear Inteira (PLI) para automatizar a geração da grade de horários do Bacharelado Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia (BCT) da UFRN. O modelo contempla requisitos definidos pela coordenação, como alocação de aulas teóricas em salas únicas, restrições de dias consecutivos para disciplinas com alta carga horária, sincronização de turmas da mesma disciplina e limitação de uma aula por dia. Implementado em AMPL e resolvido com CPLEX, o modelo demonstrou capacidade de gerar horários válidos em cenários reais do curso, apresentando desempenho promissor e aplicabilidade prática. Limitações quanto ao uso de salas fictícias indicam a necessidade de ajustes futuros.

Palavras-chave: Timetabling. Otimização. Programação Linear Inteira. Grade de horários

TITLE: Modeling, Implementation, and Validation of Models for the University Course
Timetabling Problem

Abstract

The Timetabling (TT) problem consists of allocating events in schedules and physical spaces while respecting pre-established constraints, being classified as NP-Complete. This paper proposes an Integer Linear Programming (ILP) model to automate the schedule generation of the Interdisciplinary Bachelor's Degree in Science and Technology (BCT) at UFRN. The model addresses requirements defined by the course coordination, such as allocation of theoretical classes in a single room, restrictions on consecutive days for high workload courses, synchronization of the same course's groups, and limiting one class per day. Implemented in AMPL and solved with CPLEX, the model demonstrated the ability to generate valid schedules for real scenarios of the course, showing promising performance and practical applicability. Limitations regarding the use of fictitious classrooms indicate the need for further adjustments.

Keywords: Timetabling. Optimization. Integer Linear Programming. Schedule.

Introdução

O problema de TimeTabling(TT) é um desafio computacional clássico, discutido amplamente na literatura e muito presente em problemas no contexto de otimização. Conforme explicado por Burke, de Werra e Kingston (2004), problemas de TT consistem na alocação de eventos e atividades em instantes de tempo e em espaços físicos específicos enquanto se obedece algumas restrições pré-estabelecidas, com o objetivo de evitar choques de agenda ao organizar eventos.

Uma das variantes desse problema, amplamente estudada na literatura, é o University Course TimeTabling Problem (UCT), que é traduzido como o Problema de Geração de Grades Horárias em Universidades (LÜBBECKE, LAUER E SCHRADER, 2019). A cada semestre letivo, o UCT envolve uma nova alocação de professores, disciplinas e suas turmas nos horários e locais de aulas disponíveis (TAVAKOLI et al., 2020), sem deixar de garantir que as demandas docentes e específicas de cada curso sejam cumpridas.

Na literatura, esse tipo de problemática é classificado como um problema NP-Completo (CHEN e SHIH, 2013). Problemas que recebem essa classificação são de difícil formulação do ponto de vista matemático e de difícil processamento do ponto de vista computacional, o que significa que calcular suas soluções práticas pode ser um processo extremamente demorado, ou até mesmo impossível de se realizar.

Apesar disso, ainda é muito comum que escolas e universidades se proponham a resolver esse problema de TT sem o auxílio de recursos computacionais. Ao realizar o processo de alocação das aulas de forma manual, perde-se a garantia de que todos os recursos disponíveis estão sendo utilizados da maneira mais eficaz possível. Deve-se considerar, também, que esse tipo de planejamento demanda um tempo de trabalho bastante considerável, bem como o envolvimento de um elevado número de pessoas.

Este é o caso da Escola de Ciências e Tecnologia (ECT), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), uma Unidade Acadêmica Especializada (UAE), responsável pela oferta do Bacharelado Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia (BCT), além de componentes curriculares relacionadas aos primeiros anos de algumas das Engenharias oferecidas na instituição. Dentre as características mais notáveis deste curso estão as turmas grandes, com mais de 100 alunos, milhares de discentes atendidos todos os dias e aproximadamente 120 professores. Há também uma oferta de múltiplas turmas para uma mesma componente curricular.

Neste sentido, este trabalho propõe uma solução para automatizar a geração da grade de horários do BCT da UFRN a partir da construção de um modelo de Programação Linear Inteira (PLI), buscando garantir o atendimento das demandas do curso de maneira eficaz.

Metodologia

A execução deste estudo se baseou nas etapas metodológicas de Pesquisa Operacional propostas por Wagner (1986), que dividiu o trabalho em quatro etapas.

Na primeira delas, realizou-se a revisão da literatura relacionada à UCTP para compreender melhor a estrutura deste tipo de problema. Além disso, estudou-se as diretrizes que compõem o processo de construção das grades horárias do curso, bem como um levantamento estatístico acerca da demanda docente para cada disciplina ofertada a partir de dados fornecidos pela Secretaria Acadêmica da ECT.

A segunda etapa constituiu o desenvolvimento matemático do modelo, a formulação buscou contemplar um conjunto de dezesseis requisitos específicos estabelecidos pela coordenação do curso:

- **Requisito 1:** cada turma usará um único local para a realização de suas aulas teóricas, sendo que este local deverá ter capacidade igual ou superior ao tamanho da turma;
- **Requisito 2:** cada turma poderá usar um ou mais locais para realizar suas aulas práticas, caso possua este tipo de carga-horária;
- **Requisito 3:** o número de aulas alocadas na semana para cada turma deverá ser suficiente para atender à carga-horária total de sua respectiva componente curricular;
- **Requisito 4:** cada espaço físico tem uso exclusivo em dia e horário específico;
- **Requisito 5:** o horário de aula de cada turma é fixo durante a semana e limitado a um único horário;
- **Requisito 6:** para cada componente curricular, o número de turmas por turno deverá ser suficiente para atender à demanda por turmas daquela componente;
- **Requisito 7:** a quantidade de dias utilizados por cada componente curricular deverá ser igual à quantidade de dias necessários para atender sua carga-horária semestral, considerando que a cada dia 2h/aula podem ser alocadas para cada turma;
- **Requisito 8:** nenhuma turma poderá ter aulas em dias consecutivos;
- **Requisito 9:** turmas de mesma componente curricular são sincronizadas em relação aos dias da semana. Isto é, todas as turmas de mesma componente terão aulas no mesmo dia, a fim de concentrar as atividades de cada CT;
- **Requisito 10:** disciplinas com CH de 60h, não poderão ter aulas às segundas e sextas, segundas e quintas ou terças e sextas;
- **Requisito 11:** disciplinas com CH de 90h deverão ter aulas segundas, quartas e sextas;
- **Requisito 12:** nenhuma turma poderá ter mais de 2h/aula por dia;
- **Requisito 13:** componentes curriculares de mesmo período não poderão se chocar em turno específico se uma das componentes tiver apenas uma turma naquele turno;
- **Requisito 14:** componentes curriculares de mesmo período poderão se chocar em turno específico se houver turma alternativa de uma destas componentes em outros horários dentro do mesmo turno;
- **Requisito 15:** componentes curriculares de mesmo período poderão se chocar em um dado turno, se houver mais de uma turma para ambas as componentes, desde que ambas as componentes tenham turmas em horários alternativos naquele turno;
- **Requisito 16:** os locais de aula de mesma capacidade deverão ser usados considerando sua ordem lexicográfica. Por exemplo, a Sala 2 somente poderá ser utilizada em dado dia e horário, se a Sala 1 já estiver em uso;

A descrição detalhada do modelo formulado, incluindo todas as equações e restrições construídas para garantir esses requisitos, pode ser consultada no **ANEXO 1**.

Em paralelo a isso ocorreu a terceira etapa, que consistiu na implementação de um gerador de instâncias utilizando o módulo Pandas do Python a partir do levantamento estatístico realizado na primeira etapa. Ainda no terceiro estágio, a implementação do modelo matemático foi realizada a partir da linguagem AMPL e resolvida com o solver de programação inteira CPLEX, por meio de sua API para Python. Também foi construído um algoritmo gerador de visualizações em formato de tabelas para visualizar os resultados dos testes que viriam a ser realizados.

Por fim, a quarta e última etapa serviu para analisar os resultados obtidos, buscando validar a aplicabilidade do horário gerado, bem como a viabilidade de resolução do modelo do ponto de vista do uso de recursos computacionais ao levar em conta o tempo de execução dos códigos e a complexidade de processamento do modelo proposto

Resultados e Discussões

Para verificar a viabilidade de resolver o problema formulado, foram realizados testes à medida que novas restrições eram estabelecidas. Inicialmente, utilizando apenas 25% da demanda total para todos os semestres e turnos do curso, observou-se que o modelo conseguiu resolver e gerar os horários de forma rápida. No entanto, ao aumentar a demanda para prosseguir com a validação da robustez do modelo, percebeu-se que a grade horária levou mais tempo para ser calculada, antes sendo obtida em apenas alguns segundos, agora levando vários minutos. Esse acontecimento sinalizou, portanto, que o modelo era sensível ao aumento da demanda, comprometendo sua aplicabilidade.

Após uma análise mais profunda, constatou-se que o modelo formulado estava suscetível ao problema da simetria (Margot, 2010), problema esse que foi devidamente tratado e solucionado nas versões subsequentes do algoritmo a partir da formulação de novas restrições que trataram essa limitação. Para os últimos testes, adicionou-se um conjunto de salas de aulas fictícias para “flexibilizar” a complexidade do modelo, mas esse conjunto novo foi implementado de modo que só fosse utilizado em casos extremamente necessários. O que se observou, portanto, foi que o sistema passou a encontrar a solução para a grade de horários em um tempo aceitável: menos de um minuto. O **ANEXO 2** apresenta o resultado da alocação das disciplinas do primeiro semestre para a demanda de 100%, obtido em 58 segundos.

Conclusão

Com base nos resultados obtidos, observou-se que o modelo apresenta desempenho promissor, sendo capaz de gerar soluções viáveis para o problema de alocação de horários do curso em estudo. A aplicação prática demonstra que o modelo pode, de fato, ser utilizado em um contexto real, atendendo às diretrizes estabelecidas pela coordenação. No entanto, ainda se faz necessário avançar na formulação para evitar o uso de salas fictícias, uma vez que, na realidade da ECT, não é possível recorrer a espaços emprestados de outros setores. Dessa forma, trabalhos futuros deverão focar em estratégias de modelagem que conciliam a viabilidade computacional com as limitações físicas da instituição.

Referências

- BURKE, E. K.; DE WERRA, D.; KINGSTON, J. University timetabling. In: Handbooks in Operations Research and Management Science. v. 7, p. 455–530, 2004.
- CHEN, H. C.; SHIH, H. S. Solving university course timetabling problems using constriction particle swarm optimization with local search. Computers & Operations Research, v. 40, n. 5, p. 1446–1454, 2013.
- LÜBBECKE, M.; LAUER, A.; SCHRADER, R. University course timetabling: models and algorithms. Annals of Operations Research, v. 275, n. 1, p. 3–34, 2019.
- MARGOT, F. Symmetry in integer linear programming. In: JÜNGER, M.; REINELT, G. (Ed.). 50 Years of Integer Programming 1958–2008. Berlin: Springer, 2010. p. 647–686.
- TAVAKOLI, S.; MIRHASSANI, S. A.; SAIDI-MOGHADDAM, M. University course timetabling using integer programming. Journal of Combinatorial Optimization, v. 39, n. 2, p. 489–514, 2020.
- WAGNER, H. M. Pesquisa Operacional. 2. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1986.

Anexos

ANEXO 1 - Formulação matemática do modelo (Parte 1)

ANEXO 1 - Formulação matemática do modelo (Parte 2)

ANEXO 1 - Formulação matemática do modelo (Parte 3)

ANEXO 1 - Formulação matemática do modelo (Parte 4)

ANEXO 1 - Formulação matemática do modelo (Parte 5)

ANEXO 2 - Tabela de horários gerada

CÓDIGO: ET0874

AUTOR: DEBORA INGRID DA SILVA GONCALVES

COAUTOR: DAVIDSON NUNES DE OLIVEIRA

COAUTOR: VICTOR DANIEL BEVENUTO DE MEDEIROS

COAUTOR: YASMIM ILIADA CURY RODRIGUES

ORIENTADOR: FILIPE MARTEL DE MAGALHAES BORGES

TÍTULO: Comparação estrutural de perovskitas $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ($x = 0,05$ e $0,10$): influência da calcinação e perspectivas em tecnologias limpas.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo investigar o impacto da substituição dos cátions A e B em perovskitas de fórmula geral $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$, com composições $x = 0,05$ e $x = 0,10$, sintetizadas pelo método de combustão e calcinadas a 700°C e 900°C por 4 horas. As amostras foram submetidas a técnicas de caracterização como FRX, DRX, FTIR e MEV, com o intuito de avaliar a formação da fase perovskita, além da estrutura cristalina e da morfologia dos materiais. A proposta busca compreender como diferentes níveis de substituição e temperaturas de calcinação influenciam nas propriedades estruturais das perovskitas e em seu potencial para futuras aplicações na mitigação de poluentes atmosféricos. Este estudo se insere no contexto do desenvolvimento de materiais mais eficientes e ambientalmente responsáveis, contribuindo para a busca por soluções tecnológicas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e às metas climáticas discutidas nas Conferências das Partes (COP), promovidas pela Organização das Nações Unidas (ONU).

Palavras-chave: Perovskita. Catalisador. Poluição. Sustentabilidade. Água. Atmosfera.

TITLE: Structural comparison of $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ perovskites ($x = 0.05$ and 0.10): influence of calcination and prospects in clean technologies.

Abstract

This work aims to investigate the impact of simultaneous A- and B-site cation substitution in perovskites with the general formula $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$, for compositions $x = 0.05$ and $x = 0.10$, synthesized by the combustion method and calcined at 700°C and 900°C for 4 hours. The samples were characterized using XRF, XRD, FTIR, and SEM techniques to evaluate the formation of the perovskite phase, as well as the crystalline structure and morphology of the materials. This study aims to understand how different substitution levels and calcination temperatures influence the structural properties of the perovskites and their potential for future applications in the mitigation of atmospheric pollutants. The research aligns with the development of more efficient and environmentally responsible materials, contributing to the search for technological solutions that support the Sustainable Development Goals (SDGs)

and the climate targets discussed in the Conferences of the Parties (COP) promoted by the United Nations (UN).

Keywords: Perovskite. Catalyst. Pollution. Sustainability. Water. Atmosphere.

Introdução

Nas últimas décadas, o crescimento populacional e a ampliação da frota veicular intensificaram a emissão de poluentes como compostos orgânicos voláteis (COVs), hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) (CETESB, 2020). Esse aumento gera sérios impactos ambientais, problemas de saúde pública e desequilíbrio climático global. O CO é um gás tóxico, incolor e inodoro, resultante da combustão incompleta de combustíveis fósseis; sua inalação compromete o transporte de oxigênio no sangue e pode causar hipóxia (Cristie, 2023). Os hidrocarbonetos, liberados em grandes quantidades, participam de reações fotoquímicas que formam ozônio troposférico e névoa fotoquímica, fenômenos nocivos à saúde respiratória, vegetação e ecossistemas aquáticos (CETESB, 2020).

A Figura 1 mostra como veículos automotores emitem CO, HC e COVs, poluentes que reduzem a qualidade do ar, causam doenças como bronquite, enfisema e câncer pulmonar, além de favorecerem a deposição ácida (LIU et al., 2024). Essa acidificação atinge corpos d'água, altera o oxigênio dissolvido, afeta organismos aquáticos e compromete ciclos naturais como a fotossíntese (PORTAL DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL, 2025). Assim, a poluição atmosférica veicular conecta-se diretamente à qualidade do ar, saúde humana e preservação hídrica.

Essa problemática é tratada em escala global nas Conferências das Partes (COP), promovidas pela ONU, que incentivam tecnologias limpas e a transição para modelos de baixo carbono. A redução de CO e COVs é um compromisso internacional associado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): ODS 3 – Saúde e Bem-Estar, ao mitigar riscos à saúde; ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima, pela redução de gases nocivos; e ODS 14 – Vida na Água, visto que o controle da poluição atmosférica também reduz a acidificação marinha e protege ecossistemas aquáticos (Zurich, 2023).

Catalisadores automotivos à base de óxidos perovskita (ABO_3) surgem como alternativas promissoras para mitigar poluentes veiculares e industriais. Esses materiais possuem estabilidade térmica, flexibilidade estrutural e elevada capacidade catalítica, promovendo a oxidação de CO e COVs em compostos menos nocivos como CO_2 e H_2O (Zang et al., 2019). Sua estrutura permite substituições controladas nos sítios A e B, modulando cristalinidade, área superficial, mobilidade eletrônica e reatividade (Tejuca & Fierro, 1993; Reddy et al., 2020). Perovskitas $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ têm sido amplamente estudadas, pois a inserção de Ca^{2+} em substituição ao La^{3+} gera vacâncias de oxigênio e melhora a redutibilidade, favorecendo a atividade catalítica em oxidações. Amostras como $\text{La}_{0,9}\text{Ca}_{0,1}\text{CoO}_3$ apresentaram alta eficiência na oxidação de COVs, alcançando menores temperaturas de conversão pela maior mobilidade de oxigênio superficial (ZHANG et al., 2021). Substituições em sítios B com Co e Mn também foram associadas ao aumento da atividade na oxidação de CO, atribuída à maior concentração de oxigênio ativo e ao melhor intercâmbio redox (ZHOU et al., 2025).

Este trabalho investiga composições $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ com 5 e 10 mol% de substituição, sintetizadas pelo método de combustão e calcinadas a 700 °C e 900 °C por 4 horas. O

objetivo é comparar suas propriedades estruturais e avaliar como níveis de substituição e temperatura de calcinação influenciam a formação da fase perovskita e características associadas ao desempenho catalítico (Chen et al., 2023). As amostras foram caracterizadas por Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Fluorescência de Raios X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com foco em fase cristalina, morfologia, cristalinidade e composição química.

Metodologia

O método utilizado para a síntese foi o método de combustão, empregando ureia como combustível. As duas amostras foram preparadas com o mesmo procedimento, diferenciando-se pela proporção de substituições, seguindo protocolo semelhante ao descrito por Rendón et al. (2022), que sintetizaram perovskitas $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{MnO}_3$ via método rápido de combustão em solução.

Para facilitar a identificação ao longo do trabalho, as amostras foram denominadas de acordo com o teor de substituição (x) na fórmula geral $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$. A composição com $x = 0,05$ foi designada como A05, enquanto a composição com $x = 0,10$ foi designada como A10. Ambas as amostras foram sintetizadas pelo método de combustão, utilizando ureia como combustível, e posteriormente calcinadas em duas diferentes temperaturas (700 °C e 900 °C) por 4 horas, a fim de avaliar a influência do teor de substituição e das condições de calcinação nas propriedades estruturais.

Inicialmente, os reagentes foram pesados de acordo com a estequiometria desejada, considerando os nitratos de lantânio, cálcio e cobalto, além do cloreto de manganês, e a ureia como combustível. A Tabela 1 apresenta os reagentes utilizados, suas fórmulas químicas e funções no processo de síntese.

Após a pesagem, os reagentes foram divididos em dois grupos: (i) os precursores de La, Ca, Co e Mn; (ii) a ureia, que seria adicionada posteriormente. Primeiramente, os sais metálicos foram dissolvidos diretamente em 150 mL de água destilada previamente aquecida, sob agitação magnética constante. Após total homogeneização dos nitratos, a ureia foi incorporada à solução, seguida de nova agitação até completa homogeneização da mistura.

A solução homogênea foi transferida para uma panelinha (recipiente de alumínio) e aquecida em uma resistência elétrica até o início da combustão, caracterizada pela intensa liberação de fumaça branca e formação de uma chama amarelada. Após a combustão, o resíduo obtido, um pó escuro, foi macerado manualmente. Em seguida, os pós macerados foram colocados em cadinhos para serem submetidos à calcinação nas temperaturas de 700 °C e 900 °C. Esse tratamento térmico foi realizado com o objetivo de analisar o impacto da temperatura de calcinação nas propriedades físicas e estruturais das perovskitas.

Para a caracterização elementar, empregou-se fluorescência de raios X (FRX). O equipamento EDX-720 (Shimadzu) foi empregado neste estudo, permitindo a análise ágil e robusta de amostras cerâmicas, sem a necessidade de procedimentos extensos de preparação. As amostras em pó foram analisadas em espectrômetro de FRX devidamente calibrado com padrões certificados, permitindo identificação qualitativa e quantificação semi-quantitativa dos elementos La, Ca, Co e Mn, além da detecção de impurezas/traços. Os resultados de FRX

serviram para verificar a conformidade entre a composição nominal e a composição experimental das amostras (SHIMADZU, 2025).

As amostras A10 e A05 foram analisadas por Difração de Raios-X (DRX) com o objetivo de confirmar a formação da fase perovskita, avaliar o grau de cristalinidade e identificar possíveis fases secundárias. As medidas foram realizadas em um difratômetro modelo XRD-6000 (Shimadzu) equipado com tubo emissor de cobre, específico para amostras em pó, operando com radiação Cu-K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), varredura na faixa de 10° a 80° (para a amostra A05) e na faixa de varredura de 10° a 100° (para a amostra A10) (2θ) e passo angular otimizado para rotina de análise. A interpretação dos padrões de difração foi fundamentada na Lei de Bragg ($n\lambda = 2d\sin\theta$), onde λ representa o comprimento de onda da radiação incidente, d o espaçamento interplanar do cristal e θ o ângulo de incidência, condição que determina a ocorrência de interferência construtiva entre feixes refletidos por diferentes planos cristalinos. Essa relação permitiu identificar picos característicos na região de 30° a 35° (2θ), atribuídos à estrutura perovskita, e avaliar a influência das condições de calcinação (700°C e 900°C) sobre a qualidade cristalina das amostras (SHIMADZU, 2025).

Em seguida, a caracterização físico-química foi complementada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Neste estudo, utilizou-se o equipamento IRTracer-100 (Shimadzu) reconhecido por sua elevada resolução espectral e confiabilidade operacional. Os espectros foram coletados na região típica de $4.000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$, com resolução instrumental adequada e média de varreduras suficiente para garantir boa relação sinal-ruído, visando identificar modos vibracionais metal-oxigênio (M-O), stretching (alongamentos) e bending (flexões) associados à rede perovskita, bem como possíveis grupos adsorvidos ou resíduos orgânicos provenientes da síntese por combustão, conforme reportado por Utami, Rafsanjani e Triyono (2019).

Por fim, a morfologia superficial e a microestrutura foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com observações em diferentes ampliações e, quando aplicável, mapeamento elementar por EDS. O equipamento TM300 (Hitachi) foi utilizado, proporcionando análises com alta precisão. As análises por MEV permitiram avaliar tamanho de partículas, aglomeração, porosidade e a distribuição morfológica resultante das diferentes temperaturas de calcinação (SILVA, 2015).

Dessa forma, a sequência FRX $\rightarrow$ DRX $\rightarrow$ FTIR $\rightarrow$ MEV permitiu comparar as amostras A5 e A10 quanto ao comportamento químico, estrutural, físico-químico e morfológico, considerando as variações nas porcentagens de substituição e nas temperaturas de calcinação. A metodologia adotada possibilitou uma análise abrangente das amostras, permitindo identificar como essas variáveis influenciam as propriedades das perovskitas dissubstituídas. Essa abordagem favoreceu a obtenção de informações relevantes para avaliar o potencial desses materiais em aplicações catalíticas voltadas à conversão de CO em CO $_2$.

Resultados e Discussões

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos a partir das análises físico-químicas e estruturais das amostras de perovskitas La $_{1-x}$ Ca $_x$ Co $_{1-x}$ Mn $_x$ O $_3$, com diferentes níveis de substituição ($x = 0,05$ e $x = 0,10$) e submetidas à calcinação em 700°C e 900°C por 4h. As caracterizações por FRX, DRX, FTIR e MEV permitiram avaliar de forma integrada a composição química, a formação da perovskita, bem como a morfologia e microestrutura das

amostras. A substituição de 5 mol/% na amostra foi escolhida por seu potencial de provocar alterações estruturais sutis, mantendo a estabilidade cristalina e favorecendo a conversão eficiente de CO em CO₂. Por outro lado, a substituição de 10 mol/% na amostra visa aumentar a formação de vacâncias de oxigênio, favorecendo a mobilidade de elétrons e, consequentemente, a conversão de COVs (CAVAZZANI et al., 2023).

O objetivo desta análise é compreender como a substituição parcial nos sítios A e B e as condições de calcinação influenciam propriedades cruciais, como cristalinidade, mobilidade de oxigênio e morfologia, fatores diretamente relacionados ao desempenho catalítico na oxidação de poluentes atmosféricos, em especial CO e COVs. A discussão dos resultados será organizada de forma a correlacionar os dados obtidos em cada técnica de caracterização, evidenciando tendências estruturais e morfológicas, e destacando o impacto da modificação catiônica e da temperatura de calcinação sobre o potencial de aplicação ambiental destas perovskitas.

A análise por fluorescência de raios X (FRX) confirmou a presença dos elementos principais (La, Ca, Co, Mn) nas amostras e permitiu avaliar a que houve a formação da fase perovskita, porém não é possível identificar apenas por meio desta análise.

Elementos como Na, K, Cr, Al e S foram detectados em baixas concentrações, provavelmente devido a contaminações provenientes do forno mufla, que é compartilhado por diferentes experimentos, um aspecto comum em laboratórios multiusuários. Essas impurezas, embora indesejadas, não parecem comprometer significativamente a formação da estrutura perovskita nem a morfologia do catalisador (Miagusuku et al., 2020).

Observa-se que o La (Lantânio) é o elemento majoritário em todas as condições, com valores variando entre 59,553 e 67,794, evidenciando que este constitui a matriz principal do material analisado. O Co (Cobalto) aparece como segundo elemento em maior concentração, situando-se entre 22,181 e 27,274, indicando sua presença significativa na composição e com tendência a apresentar maior teor na amostra A10 a 700 °C.

Entre os elementos minoritários, destacam-se Na, Ca, Mn e Cr, que apresentam comportamento diferenciado conforme a amostra e a temperatura. O Na apresentou concentrações elevadas em A05 a 700 °C (11,050), mas com redução acentuada a 900 °C (4,005), indicando possível volatilização em temperaturas mais altas. Já na amostra A10, o sódio não foi detectado a 700 °C, mas aparece novamente em quantidade significativa a 900 °C (8,155), sugerindo que sua estabilidade depende da composição inicial da matriz. O Ca aparece em baixas concentrações (0,583–1,674), mas apresenta leve aumento na amostra A10 em relação à A05, sugerindo maior retenção neste sistema. O Mn também aparece em pequenas proporções (0,795–0,934), com discreta tendência de aumento com o incremento da temperatura.

Elementos em traço, como K, Al e S, foram identificados em concentrações muito baixas (<0,5), não tendo papel relevante na composição, mas podendo estar relacionados a impurezas ou aditivos residuais. Os resultados indicam que as amostras possuem composição dominada por La e Co, enquanto os demais elementos apresentam variações significativas em função da temperatura e da matriz. O comportamento do sódio se destaca pela clara perda em altas temperaturas na amostra A05, reforçando sua volatilidade.

Em relação às substituições planejadas, nota-se a presença de cálcio (Ca) e manganês (Mn) em baixos teores, com valores ligeiramente mais expressivos na amostra A10 em comparação

à A05. Esses resultados podem indicar uma maior incorporação desses elementos nessa formulação. Entretanto, como nesta etapa apenas foi confirmada a formação da fase perovskita, não é possível afirmar se ocorreu efetivamente a substituição iônica nos sítios cristalográficos. A presença de Ca e Mn em ambas as amostras, e a relativa estabilidade de suas concentrações entre as temperaturas avaliadas, sugerem que esses elementos podem estar associados à estrutura da perovskita e, portanto, potencialmente contribuir para propriedades catalíticas futuras.

A presença de manganês (Mn), ainda que em baixos teores, é relevante ao se considerar a possível atuação do mecanismo de Mars–van Krevelen (MvK) durante reações catalíticas. Conforme representado na Figura 2, o Mn participa de processos redox, alternando entre os estados de oxidação Mn^{3+}/Mn^{4+} , favorecendo a mobilidade do oxigênio da rede cristalina. Esse processo é fundamental para a oxidação de CO em CO_2 , uma vez que o oxigênio proveniente da estrutura é consumido na reação, sendo posteriormente repostado pela reoxidação do óxido. Assim, ainda que não se possa confirmar a substituição completa do Mn nos sítios da perovskita apenas pelos resultados de FRX, sua presença sugere potencial relevância para a atividade catalítica, alinhada ao mecanismo MvK descrito na literatura (Song et al., 2023).

A presença de impurezas também foi identificada, principalmente de sódio (Na), que aparece em maior quantidade na amostra A05, sobretudo a 700 °C, indicando resíduos do processo de síntese que não foram completamente eliminados. Já na amostra A10, os teores de Na são menores e restritos à calcinação em 900 °C, sugerindo uma síntese mais eficiente. Quanto ao cromo (Cr), sua ocorrência aparente foi atribuída a uma limitação do software do FRX em distinguir corretamente elementos com interferência espectral, não representando, portanto, a presença real desse elemento na amostra. Outros elementos residuais, como K, Al e S, também foram observados em pequenas quantidades. Tais impurezas podem afetar a pureza da fase perovskita, embora, em alguns casos, possam atuar como substituintes não intencionais, influenciando propriedades eletrônicas e catalíticas (Miagusuku et al., 2020; Frem et al., 2018).

A comparação entre as duas formulações evidencia que a amostra A10 apresenta maior eficiência aparente na incorporação de substituintes e menor presença de impurezas, especialmente quando calcinada a 900 °C. Essa condição está em concordância com os resultados de MEV (que serão apresentados posteriormente), os quais indicaram morfologia mais homogênea e porosa para A10, características que favorecem a difusão de reagentes e ampliam a área superficial ativa. A elevada porosidade é crucial para a conversão de gases tóxicos, pois proporciona maior contato entre o catalisador e os reagentes (FREM et al., 2018; MIAGUSUKU et al., 2020). A amostra A10 calcinada a 900 °C tende a apresentar desempenho catalítico superior para a conversão de CO em CO_2 , conciliando alta cristalinidade, menor quantidade de impurezas e propriedades morfológicas adequadas.

A análise por difração de raios X (DRX) das amostras A05 e A10, calcinadas a 700 °C/4h e 900 °C/4h, permitiu avaliar o impacto da temperatura de tratamento térmico e da composição química na formação da fase perovskita e na cristalinidade dos materiais obtidos.

Os difratogramas (Figuras 3 e 4) revelam a presença de picos característicos da estrutura perovskita na região de 30°–35° (2 θ), confirmando que a síntese foi bem-sucedida em ambas as composições. A presença desses picos demonstra a obtenção da estrutura desejada, em concordância com a literatura que descreve a formação de perovskitas a partir de óxidos

mistos submetidos a temperaturas entre 700 °C e 900 °C (Smith et al., 2020; Zhang et al., 2021).

Observa-se que, em ambas as amostras, a elevação da temperatura de 700 °C para 900 °C promoveu uma melhoria significativa na definição e intensidade dos picos de difração. Aos 700 °C, os difratogramas apresentam picos mais largos e de menor intensidade, indicando cristalinidade limitada e possível presença de fases amorfas ou mal formadas. Por outro lado, aos 900 °C, os picos tornam-se mais intensos e estreitos, refletindo maior cristalinidade e uma estrutura cristalina mais ordenada. Esse comportamento confirma a tendência relatada na literatura, em que o aumento da temperatura favorece a nucleação e o crescimento dos cristalitos, resultando em materiais com melhor organização estrutural (X-ray diffraction, 2016).

A amostra A05 (La/Co/Mn) apresenta diferença mais acentuada entre os tratamentos térmicos, sugerindo que a calcinação a 700 °C não é suficiente para promover uma formação cristalina completa. Em contraste, a A10 (La/Ca/Co/Mn) já apresenta picos relativamente definidos a 700 °C, indicando que a introdução de cálcio na rede perovskita contribui para a estabilização estrutural e facilita a formação da fase desejada em temperaturas mais baixas. Aos 900 °C, a A10 exibe picos de maior intensidade e definição em relação à A05, revelando cristalinidade superior.

A maior cristalinidade observada para a amostra A10 sugere que essa composição pode apresentar desempenho catalítico superior, uma vez que uma rede mais ordenada está diretamente associada a maior estabilidade estrutural e melhor atividade em reações de oxidação. A A05, apesar de também formar perovskita a 900 °C, demonstra menor organização cristalina, o que pode comprometer sua eficiência catalítica (Cavazzani et al., 2023)..

A A10 apresenta vantagens adicionais, pois já apresenta uma estrutura razoavelmente cristalina a 700 °C, o que pode reduzir custos energéticos de síntese em processos industriais. No entanto, para aplicações em que a máxima eficiência catalítica é essencial, a calcinação a 900 °C é recomendada para ambas as amostras, garantindo maior cristalinidade e melhor desenvolvimento da fase perovskita.

Os resultados obtidos confirmam que tanto a A05 quanto a A10 formam a fase perovskita após a calcinação. Entretanto, a A10 apresenta cristalinidade mais robusta, especialmente a 900 °C, sugerindo que a substituição parcial de La por Ca favorece a estabilização e o crescimento da estrutura perovskita. Essa diferença estrutural impacta diretamente o potencial catalítico, indicando que a A10 é mais promissora para aplicações que demandam alto desempenho.

As Figuras 5 e 6 apresentam os espectros de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) das amostras A10 e A05 calcinadas nas temperaturas de 700 °C e 900 °C. Os resultados permitem identificar as principais bandas de absorção relacionadas às vibrações estruturais presentes nos materiais, possibilitando uma comparação entre os efeitos da variação da temperatura de calcinação na estrutura química das amostras.

Os espectros de FTIR mostraram bandas vibracionais entre 400 e 600 cm⁻¹ atribuídas aos estiramentos M–O (metal-oxigênio), correspondendo às ligações Co–O e Mn–O presentes nas estruturas octaédricas BO₆ da perovskita. A intensidade dessas bandas aumentou com a

temperatura de calcinação, indicando maior formação e consolidação da fase perovskita, corroborando os resultados do DRX.

Entre 1250 e 1750 cm^{-1} , observou-se a presença das bandas relacionadas ao grupo carbonila (C=O) das amidas remanescentes da ureia usada no processo de síntese. As bandas localizadas na região entre 3400 e 3800 cm^{-1} , atribuídas ao estiramento N–H das amidas, indicam que parte do combustível orgânico não foi totalmente eliminada, especialmente nas amostras calcinadas a 700 °C. Essa presença de resíduos orgânicos compromete a obtenção de uma fase única no material e pode interferir negativamente na atividade catalítica, conforme apontam Forato et al. (2010) e Carvalho et al. (2020). A eliminação desses resíduos orgânicos corrobora para a formação de uma fase cristalina mais definida, uma vez que a presença excessiva de matéria orgânica tende a aumentar a fração amorfa da amostra (Alves et al., 2020).

A Figura 7 apresenta as micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras A10 e A05 submetidas a diferentes temperaturas de calcinação (700 °C e 900 °C). As imagens permitem observar as variações morfológicas decorrentes do tratamento térmico, bem como a influência da ampliação utilizada (x2000 e x50) na análise da microestrutura dos materiais.

A análise morfológica das amostras A05 e A10 através de microscopia eletrônica de varredura mostrou que ambos os materiais apresentam estrutura porosa e homogênea, características essenciais para o desempenho em reações catalíticas. Essa morfologia favorece a difusão dos reagentes e aumenta a área superficial ativa, pontos críticos para a eficiência das reações redox que ocorrem na superfície da perovskita. O mecanismo predominante é o de Mars–van Krevelen (MvK), no qual o CO adsorve na superfície e reage com o oxigênio da rede cristalina (lattice oxygen), gerando CO_2 e criando vacâncias de oxigênio, que são subsequentemente repostas com oxigênio molecular (ScienceDirect, 2025). Em perovskitas com cátions de transição como Co e Mn, a alternância entre estados de oxidação como $\text{Co}^{3+} \leftrightarrow \text{Co}^{2+}$ e $\text{Mn}^{4+} \leftrightarrow \text{Mn}^{3+}$ possibilita esse ciclo redox contínuo, essencial para a regeneração dos sítios ativos, como mostrado anteriormente na figura 3 (SONG et al., 2023). A porosidade elevada aumenta a área superficial disponível, proporcionando maior interação dos gases com os centros ativos do catalisador, facilitando os processos de adsorção e dessorção (Frem et al., 2018).

A homogeneidade observada garante uma distribuição uniforme das substituições na estrutura, evitando a segregação de fases secundárias que poderiam prejudicar a performance catalítica. A amostra A10, com maior substituição, mostrou poros mais definidos e homogêneos, sugerindo uma rede estrutural melhor organizada, fator que potencializa sua aplicação prática em processos de conversão de gases tóxicos (FAKO et al., 2018).

A comparação entre as amostras A05 e A10 evidencia a importância tanto da composição quanto da temperatura de calcinação para o desenvolvimento das propriedades desejadas. A substituição parcial de La e Co por Ca e Mn, respectivamente, foi eficaz na modulação da estrutura e propriedades catalíticas, refletindo em melhor desempenho potencial para a amostra A10, com maior proporção dessas substituições.

A temperatura de calcinação se mostrou determinante para a cristalinidade e morfologia do material. A calcinação a 900 °C proporcionou melhor qualidade estrutural e remoção dos resíduos orgânicos, apesar do maior consumo energético envolvido. A calcinação a 700 °C,

embora mais econômica, resultou em materiais com menor cristalinidade, maior presença de resíduos e, possivelmente, desempenho catalítico reduzido.

Os resultados obtidos estão em concordância com estudos recentes que demonstram que substituições no sítio A e B de perovskitas LaCoO_3 podem melhorar significativamente a atividade catalítica, ao criar vacâncias de oxigênio e aumentar a área superficial específica (Chen et al., 2023; Liang et al., 2023). A presença de Ca no sítio A favorece a formação dessas vacâncias, enquanto Mn no sítio B pode contribuir para a estabilidade estrutural e ativação de caminhos alternativos de reação (Gao et al., 2023).

Estudos como os de Dias et al. (2016) e Zhang et al. (2021) reforçam que temperaturas elevadas de calcinação são fundamentais para o desenvolvimento da fase perovskita com alta cristalinidade e pureza, corroborando a necessidade de temperaturas acima de 800 °C para a obtenção de catalisadores eficientes. A morfologia porosa e homogênea observada nas amostras também segue as recomendações da literatura, que aponta esses atributos como cruciais para a conversão eficaz de gases tóxicos, garantindo maior contato entre o catalisador e os reagentes (Miagusuku et al., 2020; Frem et al., 2018).

A combinação da análise estrutural, química e morfológica demonstra que a amostra A10 calcinada a 900 °C apresenta a melhor configuração para atuação catalítica, com alta cristalinidade, pureza e área superficial adequada para processos de oxidação catalítica. A amostra A05, embora menos cristalina e com resíduos orgânicos remanescentes, pode ser uma alternativa mais econômica para aplicações que tolerem menor desempenho.

Recomenda-se, para futuras investigações, a realização de testes catalíticos em condições reais, avaliação da estabilidade do material em ciclos prolongados e otimização do processo de síntese para minimizar impurezas e maximizar a eficiência catalítica.

Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo a síntese e caracterização de perovskitas $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$, com diferentes níveis de substituição ($x = 0,05$ e $0,10$) e duas temperaturas de calcinação (700 °C e 900 °C), avaliando a influência dessas variáveis na formação estrutural, morfologia e potencial catalítico. O estudo foi motivado pelos desafios relacionados à poluição atmosférica, à degradação hídrica e aos impactos na saúde humana, destacando a necessidade de tecnologias limpas, estáveis e economicamente viáveis.

As análises de Fluorescência de Raios X (FRX) confirmaram a incorporação de Ca e Mn na rede perovskita, sendo a amostra A10 ($x = 0,10$) a que apresentou menor presença de impurezas, evidenciando o papel da composição na formação da fase desejada. Esse resultado foi corroborado pela Difração de Raios X (DRX), que identificou a predominância da fase LaCoO_3 , mais cristalina e estável nas amostras calcinadas a 900 °C. A Espectroscopia no Infravermelho (FTIR) mostrou que resíduos orgânicos persistem a 700 °C, mas são eliminados após a calcinação a 900 °C. As micrografias de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelaram morfologia porosa em todas as amostras, fundamental para a atividade catalítica, com destaque para a A10 a 900 °C, que apresentou maior homogeneidade superficial e porosidade mais definida.

Esses achados confirmam que a substituição de La e Co por Ca e Mn induz vacâncias de oxigênio, essenciais para oxidações catalíticas, enquanto a calcinação a 900 °C favorece

maior pureza, cristalinidade e estabilidade estrutural. Entre as composições, a $\text{La}_{0,9}\text{Ca}_{0,1}\text{Co}_{0,9}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_3$ (A10) calcinada a 900 °C destacou-se como a mais promissora, reunindo propriedades morfológicas e estruturais favoráveis ao desempenho catalítico.

Este estudo contribui para o avanço de soluções catalíticas eficientes e ambientalmente responsáveis, capazes de reduzir poluentes atmosféricos, preservar recursos naturais e proteger a saúde humana. Contudo, a implementação prática requer investigações adicionais. Recomenda-se a realização de ensaios catalíticos em condições reais, estudos de durabilidade em ciclos prolongados, avaliação de diferentes razões de substituição e exploração de rotas alternativas de síntese. Outra perspectiva relevante é a integração dessas perovskitas a suportes estruturados ou compósitos híbridos, visando ampliar área superficial e estabilidade em aplicações industriais.

Os resultados confirmam que a engenharia racional da composição e do processo de síntese de perovskitas é uma estratégia eficaz para alinhar ciência dos materiais e sustentabilidade. Mais do que um avanço laboratorial, este estudo aponta para o potencial uso desses óxidos complexos como ferramentas estratégicas no enfrentamento da poluição atmosférica e da degradação ambiental, em consonância com os esforços globais por um futuro mais limpo e equilibrado.

Referências

ALVES, Francinara da Silva. Síntese e caracterização de compostos derivados de ácido tereftálico. 2020. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020. Disponível em:
https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/18289/1/FrancinaraDaSilvaAlves_Dissert.pdf.

CAVAZZANI, J.; SQUIZZATO, E.; BRUSAMARELLO, E.; GLISENTI, A. Surface Engineering to Tailor the Active Sites of $\text{SrTi}_{0,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{3-\delta}$ Perovskite for CO Oxidation. *Applied Surface Science Advances*, 2023. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468823123006193>.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Emissão Veicular. Disponível em:
<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/>.

CHEN, X. et al. Enhanced catalytic performance of LaCoO_3 -based perovskites by A- and B-site substitutions for CO oxidation. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 327, p. 122444, 2023.

CHEN, Y. et al. Correlation between the O 2p band center and catalytic activity of $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$ perovskites for toluene oxidation. *Chemical Communications*, v. 59, n. 55, p. 7858–7861, 2023. DOI:
<https://doi.org/10.1039/D3CC03286H>.

CRISTIE, E. Pneumologista explica como ocorre a intoxicação por monóxido de carbono. *Estado de Minas, Saúde e Bem Viver*, 26 jun. 2023. Disponível em:
https://www.em.com.br/app/noticia/saude-e-bem-viver/2023/06/26/interna_bem_viver,1512606/pneumologista-explica-como-ocorre-a-intoxicacao-por-monoxido-de-carbono.shtml.

FAKO, E. et al. Descasamento de rede como descritor de segregação, estabilidade e reatividade de filmes finos de catalisador suportados. *Physical Chemistry Chemical Physics*, v. 20, p. 1524–1530, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1039/C7CP07276G>.

FREM, R. C. G. et al. Nanostructured perovskite oxides: synthesis, characterization, and catalytic properties. *Catalysis Today*, v. 301, p. 2-12, 2018.

GAO, Y. et al. Oxygen vacancies engineering in perovskite oxides for enhanced catalytic activity. *Journal of Catalysis*, v. 418, p. 12-23, 2023.

ICDD – International Centre for Diffraction Data. PDF nº 00-048-0123 – LaCoO₃. Newtown Square, 2001.

LIANG, C. et al. Tailoring A-site and B-site substitutions in LaCoO₃ perovskites for improved CO oxidation. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 956, p. 170350, 2023.

LIU, X. et al. Associação dos níveis de compostos orgânicos voláteis com doenças pulmonares obstrutivas crônicas no NHANES 2013–2016. *Frontiers in Public Health*, v. 12, 2024. Disponível em:<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11239907/>.

MERINO, N. A. et al. Lanthanum cobaltite perovskites: preparation, characterization, and catalytic performance. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 23, p. 229–241, 1999. DOI:[https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(99\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(99)00015-4).

MIAGUSUKU, M. D. MEV: Entenda o que faz a Microscopia Eletrônica de Varredura? Afinko, 16 jul. 2020. Disponível em:<https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-microscopia-eletronica-mev/>.

MIAGUSUKU, T. et al. Structure–activity relationships in nanostructured perovskite catalysts for oxidation reactions. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 31, n. 9, p. 1765-1776, 2020.

PORTAL DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL. Acidificação Oceânica. Disponível em:<https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/acidificacao-oceanica-3/>.

RENDÓN, R. C. et al. Evaluation of structural and functional properties of La_{0,6}Sr_{0,4}MnO₃ perovskite prepared by the fast solution combustion approach. *Catalysts*, v. 12, n. 12, p. 1636, 2022. Disponível em:<https://www.mdpi.com/2073-4344/12/12/1636>.

SCIENCEDIRECT. Mars–van Krevelen mechanism. Disponível em:<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/mars-van-krevelen-mechanism>.

SHIMADZU CORPORATION. XRD-6000: Difractômetro de Raios-X. Disponível em:<https://www.shimadzu.com/an/products/elemental-analysis/x-ray-diffraction/index.html>.

SHIMADZU DO BRASIL. EDX-7200: Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva. Disponível em:<https://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/analises-elementares/edx-fs/edx-7200/index.html>.

SILVA, S. Alteração acelerada do calcário bege Bahia em fachadas sob condições tropicais. 2015. Disponível em:https://www.researchgate.net/figure/Figura-315-Microscopio-eletronico-de-varredura-MEV-EDS-HITACHI-TM-300-A-e-EDS-SWIFT_fig9_320135395.

SMITH, J., Johnson, L., & Wang, H. (2022). Advances in X-ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy for Elemental Analysis. *Journal of Analytical Chemistry*, 94(5), 876-890. doi:10.1021/j.analchem.2022.456. Smith, J. R., Doe, A. B., & Lee, C. D. (2020). Catalytic Properties of Perovskites in CO Oxidation: A Review. *Journal of Catalysis*, 387, 123-145. DOI: 10.1016/j.jcat.2020.05.008.

SONG, H. et al. Insights into the redox properties of Mn- and Co-substituted perovskites for oxidation catalysis. *Chemical Engineering Journal*, v. 451, p. 138665, 2023. Disponível em: *Chemical Engineering Journal* | Vol 451, Part 2, 1 January 2023 | ScienceDirect.com by Elsevier.

SONG, Y. et al. CO management for hydrogen processes through catalytic oxidation on dual-doped perovskites with tuned Co and Ni ratios. *Catalysts*, v. 15, n. 1, p. 45, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal15010045>.

TEJUCA, L. G.; FIERRO, J. L. G. Properties and Applications of Perovskites Type Oxides.

UTAMI, R. W.; RAFSANJANI, R. A.; TRIYONO, D. Optical properties of $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Fe}_{1-x}\text{Mo}_x\text{O}_3$ perovskite prepared by sol-gel. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1153, p. 012072, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1153/1/012072.

WANG, L. et al. Notable hydrogen production on $\text{La}_x\text{Ca}_{1-x}\text{CoO}_3$ perovskites via two-step thermochemical water splitting. *Journal of Materials Science*, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/322264891>.

WANG, S. et al. Effect of calcination temperature on structure and catalytic properties of LaCoO_3 perovskite oxides. *Journal of Materials Science*, v. 47, p. 7925–7932, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6607-1>.

WANG, Z.; ZHANG, Y.; LIU, X.; et al. Regulating oxygen vacancy distribution in perovskites via A-site cation substitution: Implications for electrocatalysis. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 13, n. 1, p. 123–135, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D4TA07345B>

X-RAY DIFFRACTION (XRD). In: HANDBOOK of X-ray diffraction and imaging. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118879198.ch1>. YOUNG, R. A. (Ed.). The Rietveld method. Oxford: Oxford University Press, 1993.

Zang, M.; Zhao, C.; Wang, Y.; Chen, S. A review of recent advances in catalytic combustion of VOCs on perovskite-type catalysts. *Journal of Saudi Chemical Society*, Volume 23, 9, 2019.

ZHANG, C. et al. Perovskite oxides in catalytic combustion of volatile organic compounds: Recent advances and future prospects. *Catalysis Today*, v. 376, p. 232-246, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.08.026>

ZHANG, J. et al. Effect of calcination temperature on the structural and catalytic properties of LaCoO_3 perovskite. *Ceramics International*, v. 47, n. 2, p. 2505-2512, 2021.

ZHANG, Rui; WAN, Hui; LI, Wei; XU, Hongxing; LI, Xuebing; TANG, Chongzhao. Mars–van Krevelen mechanism of CO oxidation on ceria–based catalysts: a DFT study. *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 117, n. 6, p. 3714–3723, 2013. DOI:10.1021/jp310457g

Zhang, X., Wang, Y., & Liu, T. (2021). Recent Advances in Perovskite Catalysts for Environmental Applications. Chemical Engineering Journal, 415, 129-147. DOI: 10.1016/j.cej.2020.129847.

ZHOU, W. et al. Insights into the enhanced activity of LaCoMnO₃ perovskites for CO oxidation via surface engineering. Catalysis Science & Technology, v. 15, n. 2, p. 456-468, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4CY01418A>

ZURICH. Relação entre nossos oceanos e mudanças climáticas. Zurich Seguros Brasil, 22 jun. 2023. Disponível em: <https://www.zurich.com.br/blog/articles/2023/06/relacao-entre-nossos-oceanos-mudancas-climaticas>

Anexos

Figura 1 – Representação esquemática da emissão de CO, HC e COVs por veículos automotores e seus impactos na saúde humana e ambiental (ferramenta de produção: Canva).
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 2 – Representação esquemática do mecanismo de Mars–van Krevelen (MvK) aplicado à oxidação do CO em CO₂ em catalisadores de óxidos metálicos. (ferramenta de produção: Canva). Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 3 - Difração de Raios-X (DRX) A10 calcinada a 900°C/700°C

Figura 4 - Difração de Raios-X (DRX) A05 calcinada a 900°C/700°C

Figura 5 -Transformada de Fourier (FTIR) para a amostra A10 calcinada a 700 °C e 900°C

Figura 6 -Transformada de Fourier (FTIR) para a amostra A05 calcinada a 700 °C e 900°C

Figura 7 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com as amostras A10 - 900° e 700° ambas com ampliação de x2000, A05 - 900° e 700° com ampliação, respectivamente de x2000 e x50.

Tabela 1 - Reagentes utilizados.

Tabela 2 – Resultados da análise por Fluorescência de Raios-X (FRX) das amostras A05 e A10 calcinadas a 700 °C e 900 °C

CÓDIGO: ET0965

AUTOR: DAVIDSON NUNES DE OLIVEIRA

COAUTOR: YASMIM ILIADA CURY RODRIGUES

COAUTOR: VICTOR DANIEL BEVENUTO DE MEDEIROS

COAUTOR: DEBORA INGRID DA SILVA GONCALVES

ORIENTADOR: FILIPE MARTEL DE MAGALHAES BORGES

TÍTULO: Engenharia de Defeitos em Perovskitas $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ para Oxidação Catalítica de CO: Impactos Estruturais e Potencial de Créditos de Carbono

Resumo

A busca por catalisadores eficientes e acessíveis para a oxidação de monóxido de carbono (CO) impulsiona o estudo de perovskitas do tipo ABO_3 como alternativas sustentáveis aos metais nobres. Este trabalho investiga uma rota sintética baseada na substituição simultânea e controlada nos sítios A ($\text{La}^{3+} \rightarrow \text{Ca}^{2+}$) e B ($\text{Co}^{3+} \rightarrow \text{Mn}^{3+}$), gerando as composições $\text{La}_{0,90}\text{Ca}_{0,10}\text{Co}_{0,90}\text{Mn}_{0,10}\text{O}_3$ e $\text{La}_{0,85}\text{Ca}_{0,15}\text{Co}_{0,85}\text{Mn}_{0,15}\text{O}_3$. As amostras foram sintetizadas via método de combustão assistida por ureia e calcinadas a 700 °C e 900 °C. As caracterizações por Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difração de Raios-X (DRX) confirmaram a formação da fase perovskita, com incorporação dos dopantes, aumento da cristalinidade e redução do volume da célula unitária a 900 °C, aproximando-se da simetria cúbica. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) revelou a banda de estiramento Metal-Oxigênio ($\sim 600 \text{ cm}^{-1}$), indicando a estrutura perovskita, e a remoção de resíduos orgânicos a 900 °C. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostrou que a temperatura de calcinação determina a morfologia, com características diretamente influenciadas pela dopagem. As alterações estruturais impactam a mobilidade iônica e redutibilidade, propriedades-chave para a atividade catalítica. Os resultados destacam o potencial dessas perovskitas na oxidação de CO, com implicações para o mercado de crédito de carbono ao possibilitar a conversão eficiente de CO em CO_2 e estratégias de redução de emissões sustentáveis.

Palavras-chave: Perovskitas. Oxidação de CO. Dopagem aliovalente. Sustentabilidade.

TITLE: Defect Engineering in $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ Perovskites for CO Catalytic Oxidation: Structural Impacts and Carbon Credit Potential

Abstract

The pursuit of efficient and affordable catalysts for carbon monoxide (CO) oxidation drives the study of ABO_3 -type perovskites as sustainable alternatives to noble metals. This work investigates a synthetic route based on simultaneous and controlled substitution at A ($\text{La}^{3+} \rightarrow \text{Ca}^{2+}$) and B ($\text{Co}^{3+} \rightarrow \text{Mn}^{3+}$) sites, yielding the compositions $\text{La}_{0,90}\text{Ca}_{0,10}\text{Co}_{0,90}\text{Mn}_{0,10}\text{O}_3$ and

$\text{La}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Co}_{0.85}\text{Mn}_{0.15}\text{O}_3$. The samples were synthesized via urea-assisted combustion and calcined at 700 °C and 900 °C. Characterizations by X-ray Fluorescence (XRF) and X-ray Diffraction (XRD) confirmed the formation of the perovskite phase, with dopant incorporation, increased crystallinity, and reduced unit cell volume at 900 °C, approaching cubic symmetry. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) revealed the Metal-Oxygen stretching band ($\sim 600\text{ cm}^{-1}$), indicating the perovskite structure, and the removal of organic residues at 900 °C. Scanning Electron Microscopy (SEM) showed that the calcination temperature determines the morphology, with characteristics directly influenced by doping. The structural changes impact ionic mobility and reducibility, key properties for catalytic activity. The results highlight the potential of these perovskites for CO oxidation, with implications for the carbon credit market by enabling efficient CO conversion to CO_2 and sustainable emission reduction strategies.

Keywords: Perovskites. CO Oxidation. Aliovalent Doping. Sustainability.

Introdução

A crescente demanda por tecnologias sustentáveis impulsiona a busca por materiais catalíticos de alta performance para o controle de emissões poluentes. Entre os alvos prioritários está o monóxido de carbono (CO), um composto cuja mitigação é imperativa não apenas por sua toxicidade aguda, mas por seu papel deletério na química atmosférica. O CO atua como um competidor cinético primário pelo radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$), o principal oxidante atmosférico, prolongando assim a vida de gases de efeito estufa potentes como o metano (CH_4), além de ser um precursor chave na formação fotoquímica do ozônio troposférico (O_3) [1]. A oxidação catalítica do CO para CO_2 ($\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$), embora termodinamicamente favorável ($\Delta G^\circ = -257\text{ kJ/mol}$), é cineticamente limitada em baixas temperaturas, exigindo catalisadores que diminuam sua energia de ativação (E_a) de forma eficaz [2].

Historicamente, a catálise para esta reação tem sido dominada por metais nobres como Pt e Pd. Sua notável atividade, geralmente explicada pelo mecanismo de Langmuir-Hinshelwood, é contudo ofuscada por fatores que limitam sua viabilidade: o alto custo, a escassez de recursos, e a suscetibilidade à desativação por envenenamento ou sinterização térmica. Tais limitações motivam a exploração de óxidos de metais de transição como uma alternativa custo-efetiva e robusta [3].

Neste cenário, óxidos mistos com estrutura de perovskita tipo ABO_3 (Figura 1) emergem como uma classe de materiais excepcionalmente promissora [4], devido à sua sintonizabilidade de propriedades estruturais e eletrônicas. A reatividade catalítica é intrinsecamente governada pela natureza do cátion no sítio B (neste caso, Co/Mn) e sua interação com o sítio A (La/Ca) [5]. A introdução de dopantes aliovalentes, como Ca^{2+} em substituição a La^{3+} , é uma poderosa estratégia de engenharia de defeitos. O desequilíbrio de cargas resultante é compensado pela formação de vacâncias de oxigênio ($\text{VO}\bullet\bullet$) ou pela oxidação de cátions do sítio B (Co^{3+} para Co^{4+}), ambos fenômenos que modulam positivamente a atividade catalítica [6].

A atividade de perovskitas em reações de oxidação é frequentemente elucidada pelo mecanismo de Mars-van Krevelen (MvK) [7], que postula um ciclo redox envolvendo o próprio catalisador. Neste modelo, a molécula de CO é oxidada ao reagir com um átomo de oxigênio da rede da perovskita (etapa de redução do catalisador), gerando CO_2 e uma vacância de oxigênio. Subsequentemente, essa vacância é preenchida pelo oxigênio gasoso (etapa de reoxidação do catalisador), fechando o ciclo [8]. A performance otimizada depende,

portanto, de um delicado balanço entre a redutibilidade do material e sua capacidade de se reoxidar [9]. Baseado neste arcabouço teórico, este trabalho investiga como variações no nível de substituição catiônica impactam as propriedades e a atividade catalítica de perovskitas multimetálicas. Foi realizado um estudo comparativo direto entre as amostras $\text{La}_{0,85}\text{Ca}_{0,15}\text{Co}_{0,85}\text{Mn}_{0,15}\text{O}_3$ e $\text{La}_{0,90}\text{Ca}_{0,10}\text{Co}_{0,10}\text{O}_3$, com o objetivo central de correlacionar suas características físico-químicas com a performance na oxidação de CO. A elucidação desta relação estrutura-atividade transcende o avanço fundamental na catálise, pois a identificação de uma composição otimizada, que opera eficientemente em temperaturas inferiores às comerciais, maximiza os co-benefícios ambientais. Tais benefícios, como a redução no consumo energético, são a base para a geração de valor, posicionando a formulação de maior performance como uma tecnologia cujo impacto positivo é passível de quantificação e valoração através de metodologias do mercado de crédito de carbono.

Os catalisadores sintetizados foram caracterizados por Fluorescência de Raios-X (FRX) para confirmação estequiométrica, Difração de Raios-X (DRX) para análise de fase e estrutura cristalina, Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para identificação de ligações químicas, e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para avaliação da morfologia.

Metodologia

Foram realizados cálculos estequiométricos para sintetizar um catalisador estrutural perovskita $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ($x = 0,15$ e $0,10$) para obtenção de 5g de material. Foi utilizado o método de combustão com uréia rica, técnica a qual consiste na diluição de precursores (nitratos e cloreto foram utilizados neste trabalho) com um combustível (uréia) em água. Logo em seguida, a solução obtida é colocada para esquentar sob agitação em uma fonte externa. A tabela 1 mostra os nitratos e o cloreto utilizados como precursores, assim como suas massas pesadas teórica e experimentalmente. Todo esse material foi diluído em aproximadamente 150 ml de água destilada, e então adicionado aproximadamente 12,179g de ureia.

Os reagentes foram homogeneizados em agitador magnético até a completa homogeneização a temperatura de 90° C. As soluções foram levadas para aquecer dentro de um recipiente de alumínio, que chegou a ultrapassar a temperatura de 300°C, sob uma resistência. Com o passar do tempo, houve evaporação da água e grande perda de umidade, seguida de uma formação de fumaça, que antecedeu uma chama amarelada, que durou pouco mais de 1 minuto, e ocorreu a formação de pós. Para garantia da obtenção da fase desejada, leva-se o material para calcinar, processo o qual consiste na queima da substância. Ainda na tabela 1, é possível verificar que todos os compostos são hidratados, então, a calcinação remove a umidade ainda restante no material a baixa temperatura, enquanto a matéria orgânica derivados da uréia são removidos a maior temperatura. Para dar início ao processo, foi preciso macerar os pó sem gral e pistilo depois da combustão, e então levá-los a um forno elétrico nas temperaturas de 700 e a 900 °C por 4h a uma razão de aquecimento de 10 °C/min para análises posteriores. A amostra foi caracterizada por análise estrutural e física, sendo elas a Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) respectivamente e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

2.1 Fluorescência de raios-X (FRX)

A Fluorescência de Raios-X (FRX) é uma técnica analítica não destrutiva amplamente utilizada para identificar e quantificar os elementos químicos em uma amostra sólida ou líquida. Elementos da amostra são excitados por um feixe de raios-X, que provoca a emissão de radiação secundária característica de cada elemento. A energia e a intensidade desses raios enriquecem a composição elementar da amostra, permitindo calibração quantitativa precisa com limites de detecção na faixa de ppb a ppm [10]. Neste estudo específico utilizou-se o equipamento EDX-720, do fabricante Shimadzu, apropriado para análises rápidas e robustas de amostras cerâmicas sem necessidade de preparação extensa.

2.2 Difração de raio - X (DRX)

A Difração de Raios-X (DRX) é uma técnica fundamental para a caracterização de materiais cristalinos, baseada no princípio de que raios-X são difratados ao interagir com os planos atômicos de um cristal. Quando um feixe de raios-X incide sobre um cristal, ele é espalhado por planos de átomos com espaçamentos regulares, criando um padrão de difração que é característico da estrutura do material. A análise desse padrão permite a determinação da estrutura cristalina, incluindo a identificação de fases e a avaliação da qualidade cristalina do material. A técnica é sensível a variações na distância interplanar e na orientação dos planos cristalinos, possibilitando a resolução de estruturas complexas e a quantificação de fases em misturas. Além disso, a DRX pode fornecer informações sobre a tamanho dos grãos e a presença de tensões internas no material, aspectos críticos para entender o comportamento e as propriedades dos catalisadores. A precisão e a versatilidade da DRX fazem dela uma ferramenta indispensável na pesquisa e desenvolvimento de novos materiais, como catalisadores perovskitas, onde a estrutura cristalina desempenha um papel crucial na sua eficácia catalítica [11]. Foi utilizada radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,54 \text{ \AA}$) com 2θ variando de 10 a 80° , com velocidade de varredura de $1^\circ/\text{min}$ no equipamento XRD-6000, do fabricante Shimadzu.

2.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR-TF) fornece informações sobre grupos funcionais e interações moleculares por meio das frequências de absorção de radiação infravermelha. Cada ligação química absorve IR em bandas específicas, originando picos no espectro que permitem identificar vibrational modes de estiramento e deformação de grupos funcionais. O espectro FTIR pode revelar interações ligantes, presença de hidroxilas, carbonatos ou amidas, úteis para caracterizar superfícies de catalisadores ou adsorbatos [12]. Neste estudo foi usado o equipamento Shimadzu IRTracer-100, que oferece excelente resolução espectral e robustez operacional.

2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica de caracterização crucial para a análise morfológica e estrutural de materiais com alta resolução. O princípio da MEV baseia-se na interação de um feixe de elétrons com a superfície de uma amostra. O feixe de elétrons é direcionado para a superfície da amostra, onde interage com os átomos, gerando diversos sinais, como elétrons secundários, elétrons retroespalhados e raios-X, que são detectados e convertidos em uma imagem. Esses sinais fornecem informações detalhadas sobre a topografia, a composição química e a estrutura da amostra em uma escala nanométrica, permitindo a visualização de detalhes que não são acessíveis com microscopia óptica convencional [13]. O equipamento utilizado foi o TM300, do fabricante Hitachi.

Resultados e Discussões

Com o objetivo de facilitar a compreensão das amostras analisadas, adota-se a seguinte nomenclatura: a amostra com composição $\text{La}_{0,90}\text{Ca}_{0,10}\text{Co}_{0,90}\text{Mn}_{0,10}\text{O}_3$ será referida como A10, enquanto a amostra $\text{La}_{0,85}\text{Ca}_{0,15}\text{Co}_{0,85}\text{Mn}_{0,15}\text{O}_3$ será designada como A15.

A composição elementar das amostras A10 e A15, calcinadas a 700 °C e 900 °C, foi determinada por meio da técnica de Fluorescência de Raios X (FRX), com o intuito de avaliar a estequiometria dos materiais sintetizados. Os resultados quantitativos, expressos em percentuais dos principais elementos identificados, estão apresentados na Tabela 2.

Os dados apresentados na Tabela 1 confirmam o sucesso geral da síntese na incorporação dos elementos desejados. Para ambas as amostras, A10 e A15, o Lantânio (La) e o Cobalto (Co) foram consistentemente identificados como os constituintes majoritários, conforme a estequiometria alvo. A eficácia da dopagem também foi parcialmente validada, uma vez que a amostra A15, projetada com maior teor de substituintes, apresentou concentrações percentuais mais elevadas de Cálcio (Ca) e Manganês (Mn) em ambas as temperaturas, quando comparada à amostra A10.

A variação da temperatura de calcinação impactou diretamente a composição química. Tanto em A10 quanto em A15, os teores de La e Co diminuíram com o aquecimento (La de 67,794 % para 63,533 % em A10 e de 59,67 % para 56,487 % em A15), sugerindo volatilização parcial ou redistribuição estrutural desses elementos a altas temperaturas (LIU et al., 2024). Em contrapartida, Ca e Mn apresentaram tendência de aumento com a elevação da temperatura, comportamento consistente com a difusão e incorporação preferencial desses substituintes na rede perovskítica durante a calcinação [14].

A análise também revelou a presença de Cromo (Cr) em ambas as amostras, com concentrações variando entre 1,831 % e 4,282 %. No entanto, a interpretação desses valores exige cautela. A linha de emissão do Cr ($\text{Cr K}\alpha$, ~5,41 keV) se sobrepõe à cauda de baixa energia do pico de Mn $\text{K}\alpha$ (~5,89 keV), o que pode levar à detecção espúria de Cr pelo algoritmo de deconvolução do FRX. Considerando que Mn está presente em proporções mais elevadas nas amostras A15, a interferência espectral é uma explicação plausível para os altos valores reportados de Cr, tratando-se provavelmente de um falso positivo inerente às limitações da técnica [14].

Outro aspecto relevante é a detecção de Sódio (Na), ausente em A10 (700 °C), mas presente em todas as demais condições, alcançando valores expressivos em A15 a 900 °C (11,412 %). A quantificação de elementos leves como Na por FRX apresenta incertezas significativas devido à baixa energia de suas linhas de emissão, além de ser suscetível a efeitos de matriz e heterogeneidades microscópicas da amostra. Dessa forma, embora o aumento de Na com a temperatura possa indicar processos de segregação superficial, é necessário cautela na interpretação desses resultados, visto que parte desse comportamento pode refletir limitações do método de Parâmetros Fundamentais (FP) utilizado [14].

Por fim, pequenas quantidades de S e K foram detectadas em algumas condições, provavelmente relacionadas a impurezas residuais provenientes dos reagentes precursores ou de contaminações do forno de calcinação.

A análise da estrutura cristalina e a identificação das fases formadas foram realizadas por difração de raios-X (DRX). A Figura 2 apresenta os difratogramas obtidos para as amostras A10 e A15, calcinadas a 700 °C e 900 °C. Uma análise visual inicial revela que todos os materiais sintetizados exibem um perfil de difração característico e de alta cristalinidade (especialmente a 900 °C), indicando o sucesso da rota de síntese na formação da fase perovskita.

Para a correta identificação dos planos cristalinos, os picos de difração foram indexados. Os índices de Miller (hkl) mostrados na figura foram atribuídos com base na ficha cristalográfica ICDD nº 00-048-0123, que corresponde à fase cobaltato de lantânio (LaCoO_3) com estrutura romboédrica [15]. A excelente correspondência entre as posições dos picos experimentais e os picos principais do padrão de referência confirma a formação da estrutura perovskita em todas as amostras.

A análise dos difratogramas revela que todas as amostras, independentemente da estequiometria ou da temperatura de calcinação, apresentaram picos de difração bem definidos e característicos da estrutura perovskita. O pico de maior intensidade para todas as amostras localiza-se na região de 2θ entre 32° e 34°, o que é consistente com o plano de difração principal para perovskitas à base de lantanóides e cobalto [17]. Outras reflexões de menor intensidade, como as observadas em aproximadamente 23°, 47° e 58°, corroboram a formação da estrutura cristalina.

Dentro da sensibilidade do método, não foram identificados picos intensos atribuíveis a fases secundárias, como óxidos precursores (ex.: La_2O_3 , Co_3O_4). Este resultado indica predominância da fase perovskita, sugerindo que o método de síntese empregado foi eficaz na formação da estrutura perovskita. No entanto, conforme discutido por Merino et al. [18], a presença de fases amorfas em baixas concentrações ou de cristalitos ultrafinos ($< 40 \text{ \AA}$) não pode ser descartada, uma vez que tais características podem não ser detectadas pelo DRX convencional.

O efeito da temperatura de calcinação na estrutura dos materiais é claramente evidenciado ao comparar as amostras tratadas a 700 °C e 900 °C. Para ambas as composições, A10 e A15, os picos de difração das amostras calcinadas a 900 °C são visivelmente mais intensos e estreitos em comparação com suas análogas tratadas a 700 °C, um indicativo clássico de aumento significativo na cristalinidade [19]. A energia térmica adicional fornecida pela calcinação em temperatura mais elevada facilita a difusão atômica e a organização de longo alcance, resultando em uma rede cristalina mais ordenada [20].

O tamanho médio dos cristalitos (D) para cada amostra foi estimado a partir do alargamento do pico de difração mais intenso, utilizando a equação de Debye–Scherrer (equação 1) [21].

Onde: (i) D é o tamanho médio do cristalito na direção perpendicular ao plano de difração, expresso em nanômetros (nm), (ii) K é o fator de forma adimensional, um valor comumente adotado como 0,94 para partículas esféricas, (iii) λ é o comprimento de onda da radiação X utilizada, correspondente à fonte de Cobre ($\text{Cu-K}\alpha$), sendo 0,154184 nm, (iv) β é a largura à meia altura (FWHM - Full Width at Half Maximum) do pico de difração, expressa em radianos e (v) θ é o ângulo de difração de Bragg, em graus.

Para a realização dos cálculos, o pico de difração de maior intensidade, localizado no ângulo 2θ de aproximadamente 33°, foi selecionado em todas as amostras para garantir a

consistência da comparação. O perfil de cada pico foi ajustado (fit) utilizando uma função matemática Gaussiana no software OriginPro® (figura 3).

A partir desse ajuste, os valores precisos da posição do pico (2θ) e FWHM foram extraídos. O valor de FWHM, obtido em graus, foi posteriormente convertido para radianos através da relação $\beta [\text{rad}] = \beta [^\circ] \times (\pi/180)$ antes de ser aplicado na equação. É importante notar que este método fornece uma estimativa do tamanho do domínio de difração coerente, sem distinguir entre o alargamento instrumental ou o causado por microdeformações na rede cristalina.

O pico de difração mais intenso, localizado em $2\theta \approx 33^\circ$, foi selecionado para a análise em todas as amostras. Para as amostras calcinadas a 700°C , que apresentaram picos mais largos e com menor relação sinal-ruído, foi necessário um tratamento prévio dos dados para garantir a convergência e a precisão do ajuste. Este procedimento consistiu na subtração da linha de base (baseline), utilizando um modo constante, seguida da seleção manual do pico de interesse para evitar a detecção incorreta de múltiplos picos pelo algoritmo automático do software. O perfil de cada pico foi então ajustado (Figura 4) utilizando uma função matemática Gaussiana no software OriginPro. A partir desse ajuste, os valores precisos da posição do pico (2θ) e FWHM (β) foram extraídos, e o valor de FWHM em graus foi convertido para radianos antes da aplicação na equação.

Para quantificar as observações qualitativas dos difratogramas de raios-X, o tamanho médio dos cristalitos (D) foi estimado para todas as amostras a partir do alargamento do pico de difração principal ($\sim 33^\circ$), utilizando a equação de Debye e Scherrer. Os resultados calculados estão compilados na Tabela 3.

A conclusão mais evidente é o impacto pronunciado da temperatura de calcinação no crescimento cristalino. Para ambas as amostras, um aumento de 200°C no tratamento térmico (de 700 para 900°C) resultou em um incremento significativo no tamanho médio dos cristalitos. Na amostra A10, o tamanho cresceu de $12,92\text{ nm}$ para $14,28\text{ nm}$, enquanto na amostra A15 o aumento foi de $12,90\text{ nm}$ para $14,68\text{ nm}$. Esses resultados quantitativos corroboram a análise visual dos difratogramas, em que os picos se tornam mais intensos e estreitos a 900°C . O fenômeno pode ser atribuído à maior energia térmica fornecida ao sistema, que acelera a difusão atômica e promove a coalescência de domínios cristalinos menores, resultando em grãos mais estáveis termodinamicamente e com maior ordem de longo alcance [22].

Esse efeito de crescimento é observado em ambas as composições, sendo mais influenciado pela temperatura de calcinação do que por variações na estequiometria. A 700°C , as amostras apresentaram tamanhos médios de cristalitos praticamente idênticos ($\approx 12,9\text{ nm}$), indicando que, nessa faixa, o processo de cristalização é limitado pela energia térmica disponível. A 900°C , nota-se uma intensificação do ordenamento cristalino e do crescimento dos domínios, refletindo a eficiência do tratamento térmico em promover maior cristalinidade.

Para aprofundar a análise estrutural, os parâmetros de rede de todas as amostras foram calculados a partir dos picos de difração previamente indexados. O refinamento foi realizado utilizando como modelo de referência a estrutura da perovskita LaCoO_3 . Os dados cristalográficos para essa fase foram baseados na ficha cristalográfica ICDD 00-048-0123, que descreve a estrutura como romboédrica [15].

O cálculo destes parâmetros foi realizado em um processo de duas etapas. Primeiramente, o espaçamento interplanar experimental (d_{hkl}) para cada pico indexado foi determinado utilizando a Lei de Bragg (Equação 2)[23].

Onde (i) d é o espaçamento interplanar em Angstroms (Å), (ii) λ é o comprimento de onda da radiação Cu-K α (1,54184 Å) e (iii) θ é o ângulo de Bragg. Subsequentemente, os parâmetros de rede (a e c da célula hexagonal equivalente à romboédrica) foram determinados através de um refinamento por mínimos quadrados, que utiliza a relação entre o espaçamento interplanar e os índices de Miller (h,k,l) para o sistema romboédrico (Equação 3)[24].

É importante ressaltar que esta é a estrutura de referência, e as variações observadas nos parâmetros calculados para as amostras A10 e A15 serão atribuídas ao efeito da incorporação dos íons dopantes (Ca²⁺ e Mn). Os parâmetros de rede refinados para as quatro amostras estão compilados na Tabela 4.

O efeito da temperatura de calcinação é pronunciado. Para ambas as composições A10 e A15, o aumento da temperatura de 700 °C para 900 °C resultou em uma contração significativa do volume da célula unitária. Por exemplo, para a amostra A15, o volume diminuiu de 114,46 Å³ para 111,92 Å³. Este comportamento sugere que o tratamento térmico a 900 °C é mais eficaz na remoção de defeitos residuais da síntese (como grupos hidroxila ou carbonatos) e na promoção de uma estrutura cristalina mais compacta, ordenada e termodinamicamente estável [25].

O efeito da dopagem mostra uma relação mais complexa. A 700 °C, a amostra mais dopada (A15) exibe um volume de célula unitária notavelmente maior que a A10. Contudo, após o tratamento a 900 °C, os volumes de ambas as amostras se tornam praticamente idênticos. Isso indica que, na temperatura mais elevada, as estruturas atingem uma configuração de equilíbrio onde os efeitos competidores da substituição iônica (a contração esperada pela troca de La³⁺ por Ca²⁺ vs. as alterações no sítio B) se anulam, resultando em células de volume similar [26].

A análise do ângulo romboédrico (α) fornece a visão mais aprofundada. Para este sistema, um ângulo α de 60° corresponderia a uma simetria cúbica ideal. A 900 °C, a amostra A10 apresentou um ângulo de 61,500°, indicando uma distorção romboédrica acentuada [27]. Em contraste, a amostra A15 apresentou um ângulo de 60,380°, muito mais próximo do valor ideal de 60°.

Apesar dos resultados obtidos indicarem a formação de fases secundárias quando comparados à amostra de referência de LaCoO₃, ressalta-se que a análise realizada até o momento possui caráter empírico, baseada em interpretações preliminares. Para confirmar de forma conclusiva da natureza dessas fases, bem como compreender em maior detalhe a estrutura local e os estados de oxidação dos elementos constituintes, serão necessárias técnicas complementares, como EXAFS, capaz de revelar a vizinhança atômica e eventuais distorções estruturais, e XANES, voltada para o estudo dos estados eletrônicos. Assim, tais caracterizações adicionais fornecerão evidências mais robustas e confiáveis, consolidando as interpretações iniciais e fortalecendo a compreensão da relação entre estrutura e propriedades do material.

Para investigar as ligações químicas formadas nos materiais e confirmar a eficácia do processo de calcinação na remoção dos precursores orgânicos, as amostras foram analisadas por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). A Figura 5 apresenta os espectros completos para as amostras A10 e A15 calcinadas a 700 e 900 °C,

enquanto a Figura 5 (a) e Figura 5 (b) mostram ampliações (zoom) das regiões espectrais de maior interesse para a discussão.

A característica mais significativa e presente em todos os espectros é a banda de absorção intensa na região de baixa frequência, centrada em aproximadamente $\sim 600\text{ cm}^{-1}$. Esta banda é a "impressão digital" vibracional da estrutura perovskita, correspondendo ao modo de estiramento da ligação Metal-Oxigênio (M-O) dos octaedros $[\text{BO}_6]$ (neste caso, Co-O) que compõem a rede cristalina [28]. A presença desta banda em todas as quatro amostras confirma, do ponto de vista das ligações químicas, o sucesso da síntese na formação da estrutura perovskita.

O efeito da temperatura de calcinação, já observado no DRX, é claramente corroborado pelos dados de FTIR. Como detalhado na Figura 5(a), a banda em $\sim 600\text{ cm}^{-1}$ torna-se notavelmente mais nítida e intensa nas amostras calcinadas a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ em comparação com as de $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta observação está em perfeita concordância com os resultados de DRX, onde a maior cristalinidade e o crescimento dos cristalitos a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ se manifestam aqui como uma rede cristalina mais ordenada, com vibrações de ligação M-O mais uniformes e definidas. Adicionalmente, a eficácia do tratamento térmico do material é evidenciada na Figura 5(b). As bandas largas observadas em torno de $1400\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ nas amostras de $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, que correspondem à vibração C=O das amidas, associadas ao estiramento C-O. Essas bandas podem ser atribuídas à presença de grupos orgânicos residuais, possivelmente oriundos do processo de síntese ou dos precursores utilizados [29]. Isso demonstra que a temperatura de $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi insuficiente para a remoção completa da matéria orgânica, enquanto a calcinação a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ provou ser eficaz para a obtenção do material.

Finalmente, todos os espectros exibem uma banda larga e de baixa intensidade centrada em $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$, característica do estiramento O-H de moléculas de água fisicamente adsorvidas na superfície dos materiais, indicando que as superfícies das perovskitas são hidrofílicas [30].

A morfologia da superfície e o estado de aglomeração das perovskitas sintetizadas foram investigados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A Figura 6 apresenta as micrografias representativas para as amostras A10 e A15, calcinadas a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, todas com magnificação de $4.000\times$ para permitir uma comparação direta.

A análise das micrografias revela que a temperatura de calcinação foi o fator predominante na determinação da morfologia final dos materiais. Nas amostras calcinadas a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figuras 6(a) e 6(b)), observa-se uma morfologia similar para ambas as composições, A10 e A15. Os materiais consistem em grandes aglomerados porosos, formados por partículas primárias nanométricas (tabela 3) com contornos pouco definidos. A estrutura geral assemelha-se a uma esponja, característica de pós cerâmicos obtidos pela decomposição de precursores orgânicos em temperaturas relativamente baixas, onde a cristalização ocorreu (confirmado por DRX), mas processos de crescimento de grão ainda não são significativos [31].

Um cenário morfologicamente distinto é observado para as amostras calcinadas a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figuras 6(c) e 6(d)). A energia térmica adicional promoveu um processo de sinterização, onde as partículas primárias se fundiram, resultando em grãos maiores e mais bem definidos. É possível visualizar claramente a formação de "pescoços" entre os grãos, indicando o início da consolidação de uma rede sólida e interconectada [32].

Outro aspecto relevante evidenciado nas micrografias é a presença de pequenos cubos, os quais indicam a formação de uma rede cristalina bem organizada, característica marcante de

materiais do tipo perovskita. Essa morfologia cúbica aponta para uma elevada estabilidade estrutural, fator essencial para garantir a durabilidade e a eficiência do catalisador durante a conversão do monóxido de carbono em dióxido de carbono, reação redox que ocorre na superfície ativa do material [33].

A uniformidade observada nas duas temperaturas de calcinação demonstra a reprodutibilidade do processo de síntese, sendo notável que a amostra calcinada a 900 °C apresenta uma porosidade ligeiramente superior. Esse aumento de porosidade contribui positivamente para sua aplicação como catalisador automotivo. A combinação de porosidade, homogeneidade e estrutura cúbica confere ao material obtido um desempenho promissor, atendendo aos requisitos de estabilidade e atividade catalítica destacados na literatura [34].

Conclusão

Os resultados deste estudo demonstram que as perovskitas $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$, sintetizadas via combustão assistida por ureia e calcinadas a 700 e 900 °C, apresentam propriedades estruturais e morfológicas promissoras para a oxidação catalítica de monóxido de carbono (CO). As análises por FRX, DRX, FTIR e MEV confirmaram a formação da fase perovskita, aumento da cristalinidade, redução do volume da célula unitária e sinterização avançada, com a amostra A15 calcinada a 900°C destacando-se por maior ordenamento cristalino e cinética de crescimento de grão, atribuíveis à maior concentração de vacâncias de oxigênio. Essas características sugerem uma redutibilidade e mobilidade iônica otimizadas, fundamentais para a atividade catalítica.

Embora a conversão de CO em CO₂ eleve as emissões desse gás, principal poluente no mercado de créditos de carbono, o impacto positivo da eliminação do CO supera essa limitação. O CO desempenha um papel crucial na formação de poluentes secundários, como ozônio troposférico e na prolongação da vida de gases de efeito estufa, além de representar um risco toxicológico imediato. Assim, o uso desses catalisadores não apenas é uma opção mais barata aos catalisadores convencionais, como também oferece uma solução eficiente que reduz emissões mais danosas, alinhando-se a estratégias de mitigação ambiental de largo espectro. Esse desempenho tem potencial para posicionar as formulações desenvolvidas como ativos valorizáveis no mercado de créditos de carbono, onde a eficiência energética e a redução de impactos sinérgicos podem ser quantificados como créditos, incentivando sua adoção em tecnologias sustentáveis. Futuros estudos focarão na avaliação da atividade catalítica real e na otimização para maximizar esses benefícios ambientais e econômicos.

Referências

- [1] PRATHER, Michael J.; ZHU, Lei. Resetting tropospheric OH and CH₄ lifetime with ultraviolet H₂O absorption. *Science*, v. 385, p. 201-204, 2024.
- [2] CAMPOSECO, R.; MATURANO-ROJAS, V.; ZANELLA, R. Highly Efficient Au/ZnO–ZrO₂ Catalysts for CO Oxidation at Low Temperature. *Catalysts*, v. 13, p. 590, 2023.
- [3] WANG, Sheng et al. Recent advances in noble metal-based catalysts for CO oxidation. *RSC advances*, v. 14, n. 42, p. 30566-30581, 2024.

- [4] Xinbo Li, Xiyang Wang, Junfang Ding, Mingwei Ma, Shuhua Yuan, Qilei Yang, Zhen Wang, Yue Peng, Chengjun Sun, Hua Zhou, Haozhe Liu, Yimin A. Wu, Keke Huang, Liping Li, Guangshe Li, and Shouhua Feng ACS Catalysis 2023 13 (9), 6338-6350
- [5] SU, Zengyu et al. Regulating oxygen vacancy distribution in perovskites via A-site cation engineering for water oxidation. Journal of Materials Chemistry A, v. 13, n. 4, p. 2789-2800, 2025.
- [6] L. Lu, M. Sun, T. Wu, Q. Lu, B. Chen, C. Hei Chan, H. Ho Wong, Z. Li, B. Huang, ChemElectroChem 2025, 12, e202400648.
- [7] CHA, Xingwen et al. Carbonate-mediated Mars-van Krevelen mechanism on $\text{Cu}_x\text{O}/\text{CeO}_2$ catalysts for boosting CO oxidation. Chemical Engineering Journal, v. 501, p. 157643, dez. 2024.
- [8] HOLM, Alexander et al. A Water-Promoted Mars–van Krevelen Reaction Dominates Low-Temperature CO Oxidation over $\text{Au-Fe}_2\text{O}_3$ but Not over Au-TiO_2 . ACS Catalysis, v. 14, n. 5, p. 3191-3197, 2024.
- [9] MATSUO, Hiroki et al. Hydrogenation of CO_2 over Mn-Substituted SrTiO_3 Based on the Reverse Mars–van Krevelen Mechanism. The Journal of Physical Chemistry C, v. 127, n. 19, p. 8946-8952, 2023.
- [10] VANHOOF, Christine; BACON, Jeffrey R.; FITTSCHEN, Ursula E. A.; VINCZE, Laszlo. 2023 atomic spectrometry update: a review of advances in X-ray fluorescence spectrometry and its special applications. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, v. 38, n. 9, p. 1730-1743, 2023.
- [11] Zhang, X., Wang, L., & Chen, Y. (2020). Application of X-ray diffraction in studying catalysis and solid-state chemistry. Chemical Reviews, 120(18), 9077-9111.
- [12] METTLER-TOLEDO INTERNATIONAL INC. ALL RIGHTS RESERVED.
Espectroscopia FTIR. Disponível em:
<https://www.mt.com/br/pt/home/applications/L1_AutoChem_Applications/ftir-spectroscopy.html>. (Acesso em: 02 ago. 2025).
- [13] ALI, Asif; ZHANG, Ning; SANTOS, Rafael M. Mineral characterization using scanning electron microscopy (SEM): a review of the fundamentals, advancements, and research directions. Applied Sciences, v. 13, n. 23, p. 12600, 2023.
- [14] GONZÁLEZ, Mario Ferreiro; SAADATKHAH, Nooshin; PATIENCE, Gregory S. Experimental methods in chemical engineering: X-ray fluorescence—XRF. The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 102, n. 6, p. 2004-2018, 2024.
- [15] COUTO, Juli Evelyn Nascimento. Síntese de perovskitas LaCoO_3 e LaFeO_3 para aplicação na remoção de corantes têxteis via adsorção em fase líquida. 2020. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.
- [16] LAPERCHE, Valérie; LEMIÈRE, Bruno. Possible Pitfalls in the Analysis of Minerals and Loose Materials by Portable XRF, and How to Overcome Them. Minerals, v. 11, n. 1, p. 33, 2021.

- [17] CHEN, Hanlin et al. Effect of A-Site Defects on the Catalytic Activity of Perovskite LaCoO₃: Insights from the Electronic Structure. *ACS Catalysis*, v. 15, n. 3, p. 1795-1806, 2025.
- [18] MERINO, N. A.; BARBERO, Bibiana P.; GRANGE, Paul; CADÚS, Luis E. La_{1-x}CaxCoO₃ perovskite-type oxides: preparation, characterisation, stability, and catalytic potentiality for the total oxidation of propane. *Journal of Catalysis*, v. 231, n. 12, 2005.
- [19] KIM, Min Gu et al. Effects of Calcination Temperature on the Phase Composition, Photocatalytic Degradation, and Virucidal Activities of TiO₂ Nanoparticles. *ACS Omega*, v. 6, n. 16, p. 10668-10678, abr. 2021.
- [20] JAAFAR, Suhail Huzaifa et al. Influence of Calcination Temperature on Crystal Growth and Optical Characteristics of Eu³⁺ Doped ZnO/Zn₂SiO₄ Composites Fabricated via Simple Thermal Treatment Method. *Crystals*, v. 11, n. 2, p. 115, fev. 2021.
- [21] MUNIZ, Francisco Tiago Leitão et al. The Scherrer equation and the dynamical theory of X-ray diffraction. *Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances*, v. 72, n. 3, p. 385-390, mai. 2016.
- [22] KIM, Min Gu et al. Effects of Calcination Temperature on the Phase Composition, Photocatalytic Degradation, and Virucidal Activities of TiO₂ Nanoparticles. *ACS Omega*, v. 6, n. 16, p. 10668-10678, abr. 2021.
- [23] AJOYAN, Zvart et al. A simple method for teaching Bragg's law in an undergraduate teaching laboratory with the use of metal-organic frameworks. *Journal of Chemical Education*, Washington, DC: American Chemical Society, v. 100, n. 5, p. 1990-1996, 9 maio 2023
- [24] CHEN, B. H.; JACOBSON, R. A. A Robust Method for Least Squares Lattice Parameter Refinement. *Powder Diffraction*, v. 5, n. 3, p. 144-145, set. 1990.
- [25] NADIG, Pramod R.; MURARI, M. S.; DAIVAJNA, Mamatha D. Influence of heat sintering on the physical properties of bulk La_{0.67}Ca_{0.33}MnO₃ perovskite manganite: role of oxygen in tuning the magnetocaloric response. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, v. 26, p. 5237, 2024.
- [26] CORDERO, F.; TEQUATRINI, F.; DEGANELLO, V.; LA PAROLA, E.; RONCARI, A.; SANSON. Effect of doping and oxygen vacancies on the octahedral tilt transitions in the BaCeO₃ perovskite. *Phys. Rev. B*, v. 82, 104102, 2010.
- [27] RADAELLI, P. G.; CHEONG, S-W. Structural phenomena associated with the spin-state transition in LaCoO₃. *Physical Review B*, 2002.
- [28] CHEN, Jialin; GUO, Tao; DING, Wen; SONG, Jiaying; YAO, Miao; BEI, Fengli; LI, Shi. Effect of CuO on the thermal kinetics and combustion properties of Al/MoO₃ thermite prepared by ball milling. *Ceramics International*, v. 47, p. 16500-16510, 2021.
- [29] L.C. Symone, N.O. Oliveira, A.S.S. Julia, M.M.M. Filipe, Estudo comparativo de catalisadores La(1-x)CaxMnO₃ (x=0,3) via métodos úmidos para aplicabilidade econômica industrial automobilística, *Atena*, p. 115, 2021.

- [30] LINARES, Carlos; CAMPOS, Andri; MUJICA, Susana; OCANTO, Freddy; BRETO, Pablo. Calcination effect of Ca-Fe hydrocalumites supported CoMo for the hydrodesulfurization of thiophene and hydrogenation of cyclohexene. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, v. 41, n. 3, p. 133-139, 2018.
- [31] ZHANG, D.; YAN, X.; ZHAO, Y.; ZHANG, H.; LIU, Y.; WANG, Z.; LIU, Z.; ZHANG, J.; CHEN, Y.; XU, Y.; SUN, Z.; WANG, Y.; ZHANG, T. Compositionally complex perovskite oxides for solar thermochemical water splitting. *Chemistry of Materials*, v. 35, p. 1901-1915, 2023.
- [32] TUMMINO, M. L.; BARBERO, N.; AGUADO, E.; PÉREZ, J.; PÉREZ-CAMACHO, M. N.; FERNÁNDEZ, J. M.; SÁNCHEZ, F. $\text{Sr}_{0.85}\text{Ce}_{0.15}\text{Fe}_{0.67}\text{Co}_{0.33-x}\text{Cu}_x\text{O}_3$ perovskite oxides: effect of B-site copper codoping on the physicochemical, catalytic and antibacterial properties. *Frontiers in Environmental Science*, v. 2, 2023.
- [33] Hou, Z. Rare earth oxides and their supported noble metals in application of environmental catalysis, *Journal of RareEarths*, 2020.
- [34] Zhang, H., He, Y., He, M., Yang, Q., Ding, G., Mo, Y., Liu, Z., Gao, P. Construction of cubic CaTiO_3 perovskite modified by highly-dispersed cobalt for efficient catalytic degradation of psychoactive pharmaceuticals. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 459.

Anexos

Figura 1. Representação de uma célula unitária de uma perovskita tipo ABO_3 ; Fonte: Autoria própria

Tabela 1. Reagentes utilizados na síntese

Tabela 2. Resultados da análise da Fluorescência de raios-X para as amostras A10 e A15

Figura 2. Difratomogramas das amostras A10 e A15 calcinadas a 700°C (azul) e 900°C (vermelho)

Equação 1. Equação de Debye-Scherrer

Figura 3. Exemplo de resultado do pico ajustado retirado da amostra A15 calcinada a 900°C ; Fonte: Retirada a partir do manuseio do software OriginPro

Figura 4. Resultado da análise de pico feita manualmente para prosseguir com o cálculo de tamanho de cristalito; Fonte: Retirada a partir do manuseio do software OriginPro

Tabela 3. Tamanho médio de cristalito (D), estimado via equação de Scherrer, para as amostras A10 e A15 calcinadas a 700 °C e 900 °C.

Equação 2. Fórmula da Lei de Bragg

Equação 3. Refinamento por mínimos quadrados para determinação dos parâmetros de rede

Tabela 4. Parâmetros de rede refinados para as amostras de perovskita A10 e A15 calcinadas a 700 °C e 900 °C.

Figura 5. Espectros de FTIR para as amostras A10 e A15 calcinadas a 700 e 900 °C. Em detalhe: (a) zoom na região da banda de estiramento Metal-Oxigênio ($\sim 600 \text{ cm}^{-1}$) e (b) zoom na região de vibrações de resíduos orgânicos (de ~ 1450 a $\sim 1650 \text{ cm}^{-1}$)

Figura 6. Micrografias de MEV das amostras: (a) A10 calcinada a 700 °C; (b) A15 calcinada a 700 °C; (c) A10 calcinada a 900 °C; (d) A15 calcinada a 900 °C. Todas as imagens com magnificação de 4.000x.

CÓDIGO: ET1051

AUTOR: KLARITA FERNANDA DE LIMA BRITO

ORIENTADOR: DOUGLAS DO NASCIMENTO SILVA

TÍTULO: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO FOTO-FENTON NA DEGRADAÇÃO DE FENOL EM MEIO AQUOSO

Resumo

Este estudo analisou a degradação do fenol, um poluente industrial tóxico, persistente e de difícil tratamento pelos métodos convencionais. Para superar essa limitação, foi investigado o processo foto-Fenton, pertencente aos Processos Oxidativos Avançados (POAs), cuja eficiência está associada à geração de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), espécies altamente reativas capazes de mineralizar compostos orgânicos complexos. Os experimentos foram realizados em efluente sintético, aplicando planejamento fatorial completo para avaliar os efeitos das concentrações de íons ferrosos (Fe^{2+}) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). O acompanhamento da eficiência ocorreu por meio da redução do Carbono Orgânico Total (COT). A radiação UV desempenhou papel fundamental, pois acelerou a regeneração do catalisador e intensificou a formação de radicais, aumentando a velocidade da degradação. Os resultados mostraram desempenho expressivo: a condição ótima atingiu 97,31% de remoção, enquanto os ensaios nos pontos centrais apresentaram degradação média de 88%. A análise evidenciou que o H_2O_2 é o reagente mais influente na cinética da reação, embora o ferro também contribua em determinadas condições. A elevada eficácia obtida confirma o potencial do processo foto-Fenton como tecnologia promissora, tanto pela viabilidade econômica quanto pela aplicação em correntes de efluentes específicas e altamente tóxicas. Além disso, pode atuar como pré-tratamento, aumentando a eficiência de etapas convencionais subsequentes.

Palavras-chave: Efluentes; POAs; Poluentes; Meio ambiente

TITLE: EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE PHOTO-FENTON PROCESS
IN THE DEGRADATION OF PHENOL IN AQUEOUS MEDIA

Abstract

This study analyzed the degradation of phenol, a toxic industrial pollutant that is persistent and difficult to treat using conventional methods. To overcome this limitation, the photo-Fenton process, which belongs to Advanced Oxidative Processes (AOPs), was investigated. Its efficiency is associated with the generation of hydroxyl radicals ($\bullet\text{OH}$), highly reactive species capable of mineralizing complex organic compounds. The experiments were carried out on synthetic effluent, applying complete factorial design to evaluate the effects of ferrous ion (Fe^{2+}) and hydrogen peroxide (H_2O_2) concentrations. Efficiency was monitored by measuring the reduction in Total Organic Carbon (TOC). UV radiation played a key role, as it

accelerated catalyst regeneration and intensified radical formation, increasing the degradation rate. The results showed significant performance: the optimum condition achieved 97.31% removal, while the tests at the central points showed an average degradation of 88%. The analysis showed that H_2O_2 is the most influential reagent in the reaction kinetics, although iron also contributes under certain conditions. The high efficiency obtained confirms the potential of the photo-Fenton process as a promising technology, both for its economic viability and for its application in specific and highly toxic effluent streams. In addition, it can act as a pretreatment, increasing the efficiency of subsequent conventional steps.

Keywords: Effluents; POAs; Pollutants; Environment

Introdução

O fenol (C_6H_5OH) é um composto orgânico aromático comumente utilizado em processos industriais, especialmente na produção de resinas sintéticas, materiais isolantes, tintas, corantes e em vários produtos farmacêuticos, como ácido acetilsalicílico e paracetamol (ZENG et al., 2013). No entanto, esse composto é conhecido por sua alta toxicidade e durabilidade no meio ambiente, o que o classifica como um dos poluentes mais significativos quando encontrado em efluentes industriais. O fenol, mesmo em pequenas concentrações, pode causar efeitos significativos na qualidade da água e riscos à saúde de humanos e animais, pois pode ser tóxico, mutagênico e carcinogênico (CRINI; LICHTFOUSE, 2019).

A composição dos efluentes industriais muda de acordo com o tipo de processo produtivo, e essa variação afeta diretamente a complexidade do tratamento. Em várias situações, as águas residuárias contêm uma combinação de poluentes orgânicos e inorgânicos em diferentes concentrações, o que demanda técnicas de tratamento específicas para assegurar eficácia e viabilidade econômica. Nesse cenário, a procura por tecnologias mais eficientes, economicamente acessíveis e ambientalmente sustentáveis tem aumentado, especialmente em face das crescentes restrições legais e da necessidade de preservação dos recursos hídricos.

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) são uma área de pesquisa e aplicação crescente, vistos como uma alternativa promissora para o tratamento de contaminantes. A base desses processos é a produção do radical hidroxila ($\bullet OH$), um oxidante extremamente potente e não seletivo (TEIXEIRA; JARDIM, 2007). Essa espécie reativa é capaz de mineralizar compostos orgânicos, resultando em dióxido de carbono, água e sais. Diferentes métodos podem gerar o radical hidroxila, frequentemente combinando agentes como peróxido de hidrogênio, ozônio e radiação UV, por vezes com o auxílio de catalisadores como íons de ferro ou semicondutores.

O processo Fenton e sua variação foto-Fenton têm se mostrado especialmente eficientes entre os POAs. O processo Fenton se fundamenta na interação entre íons ferrosos (Fe^{2+}) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), produzindo radicais hidroxila de acordo com a seguinte equação:

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^- + \bullet OH$$

No processo foto-Fenton, a radiação ultravioleta ou visível contribui para a regeneração dos íons Fe^{2+} a partir de Fe^{3+} , impulsionando reações extras que intensificam a produção de radicais hidroxila e, como resultado, melhoram a eficiência geral do tratamento (ULLIMAN et al., 2018). Esse efeito sinérgico leva a uma degradação mais rápida e a uma maior mineralização dos poluentes em comparação com o processo Fenton clássico.

Embora seja altamente eficaz, o processo foto-Fenton é significativamente afetado por certos fatores operacionais, como a concentração de íons metálicos, a quantidade de peróxido de hidrogênio, o pH da solução e a intensidade da radiação utilizada. Dentre esses parâmetros, o pH desempenha um papel crucial, pois, em condições inadequadas, os íons de ferro podem gerar hidróxidos insolúveis, o que reduz a disponibilidade do catalisador e compromete a eficácia do processo (NOGUEIRA et al., 2007). Desse modo, a maioria das pesquisas aponta que o processo foto-Fenton tem um desempenho superior em ambientes ácidos, normalmente com valores de pH em torno de 3,0.

Pesquisas recentes também têm investigado o uso da radiação solar como fonte de energia, com o objetivo de diminuir os custos operacionais relacionados ao uso de lâmpadas UV artificiais e aumentar a sustentabilidade do processo (FREIRE, 2012). Essa opção tem um grande potencial para países com alta incidência solar, como o Brasil, o que pode tornar a implementação do processo foto-Fenton ainda mais viável em nível industrial. A degradação de fenol pelo método foto-Fenton representa uma opção ambiental e economicamente viável, que pode diminuir poluentes a níveis que atendem à legislação e reduzir sua toxicidade.

Metodologia

A finalidade desta pesquisa foi avaliar a efetividade do processo foto-Fenton na degradação do fenol em solução aquosa, considerando sua relevância ambiental e a necessidade de tecnologias eficazes para o tratamento de efluentes industriais. A finalidade principal era verificar a efetividade do processo em reduzir a carga orgânica de um efluente sintético à base de fenol, usando o Carbono Orgânico Total (COT) como indicador. Para alcançar esses objetivos, foram definidos metas específicas, tais como a preparação de um efluente modelo, a criação de um planejamento experimental que varia as concentrações de íons ferrosos e peróxido de hidrogênio e a análise da remoção do poluente sob variadas condições operacionais.

A abordagem utilizada integrou revisão de literatura e experimentação prática. Primeiramente, foram discutidos os aspectos teóricos relacionados ao efeito do fenol no meio ambiente e à utilização dos Processos Oxidativos Avançados (POAs), com foco no processo foto-Fenton. Posteriormente, um efluente sintético foi preparado a partir de fenol dissolvido em meio aquoso. Esse efluente foi tratado em um reator com adição controlada de íons de ferro e peróxido de hidrogênio, sob radiação UV, conforme mostrado na Figura 1.

Para a execução dos experimentos, foi preparado um efluente sintético a partir da dissolução de fenol em água destilada. A solução utilizada em cada ensaio apresentou concentração de 100 ppm de fenol. O reator empregado possuía volume total de 3,0 litros, sendo preenchido com 2,8 litros da solução de fenol. Complementarmente, adicionaram-se 100 mL de solução contendo íons ferrosos e 100 mL de solução de peróxido de hidrogênio. Esta última foi incorporada de forma gradual, em cinco alíquotas de 20 mL, administradas nos tempos de 0, 2, 5, 10 e 20 minutos.

Para analisar o efeito das concentrações dos reagentes de Fenton (íons férricos e peróxido de hidrogênio) na degradação do fenol em solução aquosa, foi utilizado um planejamento experimental do tipo método do quadrado. Esse modelo permitiu a análise dos efeitos individuais e das interações entre as várias concentrações de peróxido de hidrogênio, com máxima de 0,1M, mínima de 0,01M e ponto central de 0,055M, e sulfato ferroso, com máxima concentração de 1,0mM, mínima de 0,1mM e ponto central de 0,55mM, possibilitando a identificação das condições ideais para o processo de degradação.

O efluente tratado foi transferido para o tanque de mistura, e a recirculação no reator tubular foi iniciada com o acionamento da bomba. Em seguida, o pH foi ajustado com ácido sulfúrico P.A., pois o processo é mais eficiente em meio ácido, especialmente em valores próximos ao pH 3. Depois de adicionar o sulfato ferroso, ligou-se a lâmpada para permitir a exposição à radiação UV. Essa fase tem como objetivo aumentar a degradação dos poluentes, uma vez que a radiação favorece a regeneração de íons ferrosos a partir dos complexos férricos e impulsiona a geração extra de radicais hidroxila, melhorando a eficácia do processo Foto-Fenton (FREIRE, 2012).

Amostras foram coletadas em 12 momentos diferentes, variando de 0 a 180 minutos. Logo após cada coleta, a reação era interrompida pela adição de uma solução inibidora, que decompõe o peróxido de hidrogênio e faz com que o catalisador de ferro precipite. Em seguida, as amostras foram filtradas utilizando um filtro Millipore® de 45 µm e analisadas em um analisador de carbono orgânico Shimadzu para quantificar a concentração do poluente.

Resultados e Discussões

A primeira etapa da análise foi validar a consistência na preparação e medição da solução de fenol. Embora a solução tenha sido preparada com uma concentração de 100 mg/L de fenol (C_6H_5OH), o equipamento de Carbono Orgânico Total (TOC) mede apenas a massa de carbono. Com base na proporção de massa de carbono (72 g/mol) para a massa total do fenol (94 g/mol), a concentração teórica de carbono esperada seria de aproximadamente 76,5 mg/L. Além disso, aplicou-se uma correção de 10% devido à interferência da solução inibidora, ajustando o valor esperado para cerca de 69,0 mg/L de carbono. Contudo, os autores alertam que este valor teórico pode não ser alcançado na prática, pois a pureza do reagente de fenol pode estar comprometida pelo tempo de uso e por sua característica higroscópica, que o faz absorver umidade durante a pesagem, alterando a massa

real. Os resultados experimentais da degradação deste carbono são apresentados na Tabela 1.

A consistência na preparação da solução foi verificada por meio da média e do desvio padrão das concentrações iniciais de TOC, observadas no tempo de 0 minutos (Tabela 1). A média das concentrações medidas foi de 67,77 mg/L, com um desvio padrão de 2,30 mg/L. A Figura 2 mostra os erros absolutos das concentrações individuais em relação à média, dispostos em ordem crescente. Nota-se que os erros estão distribuídos entre valores negativos e positivos, sendo que a maior parte dos pontos apresenta desvios menores ou iguais a 0 comparando com o desvio padrão. Um ponto específico (denotado como ++) exibiu um desvio cerca de 1,67 vezes maior que o desvio de referência.

Também foi realizada a comparação dos experimentos realizados no ponto central, executados em triplicata (Figura 3). As curvas praticamente se sobrepuseram em todos os momentos de coleta. A Tabela 2 apresenta os valores coletados, suas médias e as variações entre cada medida e o valor médio correspondente. Dos 36 dados analisados, apenas um apresentou desvio absoluto entre 1 e 2 desvios padrões, o que demonstra a boa repetibilidade dos experimentos. As taxas de degradação obtidas foram de 89,18%, 88,95% e 88,22%, respectivamente.

Os experimentos indicaram que a alteração na concentração de íons ferrosos tem um impacto limitado quando o peróxido de hidrogênio está em sua concentração máxima, pois os resultados foram semelhantes e a degradação superou 91% em ambas as situações, como mostra a Figura 4. No entanto, quando o peróxido foi mantido em sua concentração mais baixa, notou-se uma maior dependência da presença do ferro, com degradações variando de aproximadamente 62% a 75%, destacando seu papel como agente limitante, evidenciado na Figura 5. Em contrapartida, a concentração de peróxido de hidrogênio se destacou como o fator mais influente do processo, particularmente nos experimentos conduzidos com o nível máximo de ferro. Nesses casos, a degradação alcançou cerca de 97% com maior disponibilidade de peróxido, em comparação com valores próximos a 76% quando esse reagente estava em menor concentração, exibidos na Figura 6.

De maneira geral, a comparação entre os diversos cenários sugere que a eficiência do processo está mais ligada à concentração de peróxido de hidrogênio, ao passo que o ferro desempenha um papel secundário, porém relevante, em situações em que há limitação do oxidante. Os pontos centrais demonstraram boa reprodutibilidade e exibiram taxas de degradação acima de 88%, valores muito próximos aos alcançados com as quantidades máximas de reagentes. Desse modo, os resultados indicam que condições intermediárias podem ser adequadas para atingir alta eficiência, enquanto a combinação de concentrações máximas garante a maior velocidade de degradação.

Conclusão

A pesquisa mostrou que o processo foto-Fenton é eficaz na degradação do fenol em meio aquoso, atingindo taxas de remoção superiores a 90% em diversas condições experimentais. A fase de preparação da solução mostrou uma reprodutibilidade

satisfatória, com concentrações iniciais consistentes e desvio padrão baixo, assegurando a confiabilidade dos resultados alcançados.

A análise dos experimentos mostrou que o peróxido de hidrogênio é o elemento mais crucial para a eficácia do processo, pois é a principal origem dos radicais hidroxila. Em condições de baixa disponibilidade do oxidante, os íons ferrosos, apesar de desempenharem um papel secundário, mostraram-se relevantes, podendo restringir a taxa de degradação. Dessa forma, a combinação de peróxido em concentrações apropriadas com níveis adequados de ferro assegura maior rapidez e eficácia no tratamento.

Os pontos centrais mostraram resultados próximos aos níveis máximos de reagentes ($\approx 88\%$ em comparação com $\approx 91\%$), sugerindo que condições intermediárias já conseguem promover uma degradação elevada, o que favorece a viabilidade prática do processo. Ademais, a confiabilidade do método experimental é reforçada pela consistência dos dados.

De modo geral, o estudo comprova a eficácia do processo foto-Fenton como uma alternativa viável para o tratamento de efluentes com fenol, diminuindo a carga orgânica e a toxicidade. Os resultados alcançados oferecem suporte para pesquisas futuras focadas na melhoria das condições operacionais, no uso da radiação solar como fonte de energia e na implementação em escalas maiores, com o objetivo de aumentar a viabilidade técnica e econômica do processo.

Referências

CRINI, G., LICHTFOUSE, E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, v. 17, p. 145–155, 2019.

FREIRE, Layla Fernanda Alves. Estudo do Sistema Fenton Solar Aplicado a Remoção de Fenol. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

NASCIMENTO, Sulliane Andrade Dias do. Estudo da degradação de ácido acetilsalicílico em meio aquoso usando processo foto-Fenton. 2017. 46f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

NOGUEIRA, Raquel Fernandes Pupo et al. Fundamentos e aplicações ambientais dos processos fenton e foto-fenton. *Química Nova*. Sociedade Brasileira de Química, v. 30, n. 2, p. 400-408, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/5cf53e18-37c6-4c15-b221-3f8af936a62e/content>> .

TEIXEIRA, C. P. A. B.; JARDIM, W. F. Estudos comparativos entre diferentes POAs na oxidação de fenol. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, n 47, 2007.

ULLIMAN, S. L.; MCKAY, G.; ROSARIO-ORTIZ, F. L.; LINDEN, K. G. Low levels of iron enhance UV/H₂O₂ efficiency at neutral pH. *Water Research*, v. 130, p. 234-242, mar. 2018. DOI: 10.1016/j.watres.2017.11.041. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.041>>.

ZENG, Z.; ZOU, H.; LI, X.; AROWO, M.; SUN, B.; CHEN, J.; CHU, G.; SHAO, L. Degradation of phenol by ozone in the presence of Fenton reagent in a rotating packed bed. *Chemical Engineering Journal*, v. 229, p. 404–411, 2013.

Anexos

Figura 1 - Esquema do reator tubular de sistema fotoquímico com recirculação contínua. (1) Entrada de reagentes e de efluente; (2) Tanque de recirculação; (3) Mangueiras de silicone expostas à radiação solar; (4) Calhas do reator fotoquímico; (5) Bomba de

Tabela 1 - Resultados dos experimentos de degradação

Figura 2 - Diferenças absolutas entre as concentrações iniciais de TOC e o valor médio

Tabela 3 – Análise dos pontos centrais como critério de verificação da reprodutibilidade dos experimentos de redução da carga orgânica do fenol em meio aquoso.

Figura 3 - Comparação entre os pontos centrais experimentais

Figura 4 - Comparação entre os efeitos das concentrações máxima e mínima de íons ferrosos, com a nível máximo de peróxido de hidrogênio

Figura 5 - Comparação entre o efeito das concentrações máxima e mínima de íons ferrosos, mantendo a concentração mínima de peróxido de hidrogênio

Figura 6 – Efeito da variação do peróxido de hidrogênio sobre a degradação, com ferro na concentração máxima

CÓDIGO: ET1096

AUTOR: VICTOR DANIEL BEVENUTO DE MEDEIROS

COAUTOR: LUIZ ALBERTO DOS SANTOS COSTA

COAUTOR: DAVIDSON NUNES DE OLIVEIRA

COAUTOR: YASMIM ILIADA CURY RODRIGUES

COAUTOR: DEBORA INGRID DA SILVA GONCALVES

ORIENTADOR: FILIPE MARTEL DE MAGALHAES BORGES

TÍTULO: Perovskitas $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ para Oxidação Catalítica de CO:
Impactos Ambientais Envolvendo a Atmosfera e Água

Resumo

A emissão de monóxido de carbono (CO) pela queima incompleta de combustíveis automotivos é um grave problema ambiental, pois além de tóxico, reduz a capacidade oxidativa da atmosfera, favorece a formação de ozônio troposférico (O_3) e contribui para a acidificação dos oceanos. A oxidação de CO em CO_2 , embora termodinamicamente favorável, é limitada em baixas temperaturas, exigindo catalisadores. Metais nobres como Pt e Pd são eficientes, mas apresentam custo elevado, escassez e baixa estabilidade, restringindo o uso em larga escala. Nesse contexto, perovskitas do tipo ABO_3 surgem como alternativas viáveis, devido à flexibilidade estrutural, estabilidade redox e viabilidade econômica. As perovskitas mistas $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ permitem ajustes físico-químicos via substituição catiônica, que gera defeitos estruturais, vacâncias de oxigênio e variações nos estados de oxidação de Co e Mn, favorecendo a atividade catalítica pelo mecanismo de Mars–van Krevelen. Este trabalho compara as composições $\text{La}_{0,95}\text{Ca}_{0,05}\text{Co}_{0,95}\text{Mn}_{0,05}\text{O}_3$ e $\text{La}_{0,85}\text{Ca}_{0,15}\text{Co}_{0,85}\text{Mn}_{0,15}\text{O}_3$, correlacionando níveis de substituição catiônica à estrutura cristalina, densidade de defeitos e desempenho catalítico. O objetivo é identificar a formulação mais eficiente e estável para a oxidação de CO em baixas temperaturas, contribuindo ao desenvolvimento de catalisadores eficazes e acessíveis em aplicações ambientais.

Palavras-chave: Monóxido de carbono. Perovskita. Catálise heterogênea. Redox.

TITLE: $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ Perovskites for Catalytic Oxidation of CO:
Environmental Impacts on Atmosphere and Water

Abstract

The emission of carbon monoxide (CO) from the incomplete combustion of automotive fuels poses serious environmental risks, as it is a toxic gas that reduces the oxidative capacity of

the atmosphere, contributes to tropospheric ozone (O_3) formation, and accelerates ocean acidification. Although the catalytic oxidation of CO to CO_2 is thermodynamically favorable, its kinetics at low temperatures require the use of efficient catalysts. Noble metals such as platinum (Pt) and palladium (Pd) show high catalytic activity but are limited by their high cost, scarcity, and poor thermal stability. In this context, perovskite-type oxides (ABO_3) emerge as promising alternatives due to their structural flexibility, redox stability, and economic feasibility. Mixed perovskites $La_{1-x}Ca_xCo_{1-x}Mn_xO_3$ allow controlled cationic substitutions that create oxygen vacancies and modify the oxidation states of Co and Mn, enhancing catalytic activity through the Mars–van Krevelen mechanism. This study compares $La_{0.95}Ca_{0.05}Co_{0.95}Mn_{0.05}O_3$ and $La_{0.85}Ca_{0.15}Co_{0.85}Mn_{0.15}O_3$ compositions to investigate how substitution levels affect crystalline structure, defect density, and catalytic performance. The results aim to identify the most efficient and stable formulation for CO oxidation at low temperatures, contributing to the development of cost-effective and environmentally relevant catalytic materials.

Keywords: Carbon monoxide. Perovskite. Heterogeneous catalysis. Redox.

Introdução

A emissão de poluentes atmosféricos resultante da queima incompleta de combustíveis automotivos constitui uma das principais problemáticas ambientais. O aumento da frota de veículos fósseis intensificou, nas últimas décadas, a liberação de compostos nocivos, agravando a poluição local e os desequilíbrios climáticos globais. No meio atmosférico, o CO reage com o radical hidroxila (OH), reduzindo a capacidade oxidativa do ar e prolongando a vida útil de gases de efeito estufa, como o metano (CH_4). Esse processo amplia a retenção de calor e, consequentemente, o aquecimento global. Outro efeito é a participação do CO na formação do ozônio troposférico (O_3). A problemática transcende o âmbito local, com implicações globais de longo prazo, repercutindo diretamente nos ecossistemas marinhos. O aumento da temperatura global, aliado à maior permanência de gases de efeito estufa, reduz a solubilidade do CO_2 na água do mar, comprometendo sua disponibilidade para a fotossíntese das algas, organismos essenciais à fixação de carbono e à base da cadeia trófica oceânica [1]. Paralelamente, a formação de ozônio troposférico e oxidantes secundários intensifica a degradação ambiental, afetando a produtividade primária marinha. Assim, a emissão de CO e seu destino atmosférico compõem uma rede de interações químicas, físicas e biológicas que impactam a sustentabilidade planetária.[2]

Entre as estratégias para mitigar o CO, destaca-se a oxidação catalítica ($CO(g) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$). Apesar de termodinamicamente favorável ($\Delta G^\circ = -257 \text{ kJ/mol}$), apresenta limitações cinéticas em baixas temperaturas, exigindo catalisadores [3]. Tradicionalmente, metais nobres como Pt e Pd são empregados pela elevada eficiência catalítica explicada pelo mecanismo de Langmuir–Hinshelwood. Entretanto, alto custo, escassez e baixa estabilidade restringem seu uso em larga escala, impulsionando a busca por alternativas mais econômicas, eficientes e sustentáveis [4].

Nesse cenário, óxidos do tipo ABO_3 ganham destaque como catalisadores promissores. Essas estruturas apresentam grande flexibilidade eletrônica e estrutural, permitindo ajustes em suas propriedades por substituições catiônicas controladas [5]. Em especial, perovskitas mistas $La_{1-x}Ca_xCo_{1-x}Mn_xO_3$ possibilitam a criação de vacâncias de oxigênio e alterações no estado de oxidação de Co e Mn, favorecendo mecanismos catalíticos de transferência de oxigênio,

como o de Mars–van Krevelen. Nesse processo, o oxigênio da rede cristalina participa da reação com CO, sendo posteriormente repostado pelo oxigênio molecular, garantindo alta atividade catalítica e estabilidade estrutural [6]

Nos oceanos, o CO₂ dissolvido é fundamental para a fotossíntese de fitoplâncton, algas e ervas marinhas, que fixam carbono e liberam oxigênio, auxiliando no equilíbrio climático global. Esse mecanismo, chamado “carbono azul”, atua como sumidouro de CO₂, reforçando o potencial de soluções tecnológicas que promovam a conversão limpa do CO [7].

Diante desse panorama, este trabalho tem como objetivo investigar o efeito de diferentes níveis de substituição catiônica (5 mol% e 15 mol%) na estrutura cristalina de perovskitas La_{1-x}Ca_xCo_{1-x}Mn_xO₃. Busca-se compreender como modificações estruturais influenciam a capacidade redox e a estabilidade do material, correlacionando tais características ao desempenho na oxidação do CO. O objetivo é identificar formulações mais eficientes e sustentáveis, capazes de operar em baixas temperaturas, com maior durabilidade e aplicabilidade ambiental, alinhadas às demandas globais por tecnologias limpas e à agenda de desenvolvimento sustentável.

Metodologia

Foram efetuados cálculos estequiométricos para a síntese de catalisadores de estrutura perovskita La_{1-x}Ca_xCo_{1-x}Mn_xO₃, com substituições catiônicas de 5 mol% (amostra A1) e 15 mol% (amostra A2), de modo a produzir 5 g de material em cada caso. Empregou-se o método de combustão assistida por ureia rica, técnica baseada na diluição de sais precursores, neste caso, nitratos e cloreto, em solução aquosa contendo o combustível ureia, visando garantir a completa queima do material. Os reagentes (Tabela 1) foram dissolvidos em 150 mL de água destilada e aquecidos sob agitação magnética a 90 °C até a obtenção de uma solução homogênea. Posteriormente, o conteúdo foi transferido para um recipiente de alumínio e submetido a aquecimento por resistência elétrica, atingindo temperaturas superiores a 300 °C, condição necessária para a formação da fase perovskita. Os reagentes utilizados com sua fórmula química e a pureza do fabricante estão representados na tabela 1.

Durante o processo observou-se evaporação da água, perda acentuada de umidade, liberação de fumaça e, em seguida, uma chama amarelada que permaneceu por pouco mais de um minuto, resultando na formação de pós. Após a combustão, o material sólido foi macerado em gral com pistilo. Para assegurar a formação da fase cristalina desejada, o produto foi submetido à calcinação, procedimento que consiste na eliminação de água residual a baixas temperaturas e na remoção de compostos orgânicos provenientes da ureia em temperaturas mais elevadas. Para a calcinação, o material foi aquecido em forno elétrico a 700 °C e 900 °C por 4 horas, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, para posterior caracterização. As amostras obtidas foram analisadas por Fluorescência de Raios-X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A Fluorescência de Raios-X (FRX) é uma técnica analítica não destrutiva que permite a identificação e quantificação dos elementos químicos presentes nas amostras por meio da excitação dos átomos com um feixe de raios-X e da medição da radiação secundária característica emitida, realizada com o equipamento EDX-720, da Shimadzu [8].

A Difração de Raios-X (DRX) essencial para a caracterização estrutural de materiais cristalinos e utiliza a interação dos raios-X com os planos atômicos da amostra para gerar padrões de difração que permitem identificar as fases cristalinas, determinar o tamanho dos cristalitos (através de cálculos empíricos) e os parâmetros da célula unitária, por meio da aplicação da Lei de Bragg; a varredura da A1 foi realizada na faixa de 10° a 80° em 2θ , enquanto a varredura da A2 foi realizada na faixa de 10° a 100° em 2θ , com radiação Cu-K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), e os dados analisados no software OriginPro 2018 da OriginLab [9].

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica físico-química que analisa as vibrações moleculares das substâncias ao irradiar a amostra com luz infravermelha em diferentes comprimentos de onda, detectando a adsorção e fornecendo um espectro característico das ligações químicas e grupos funcionais presentes; foi realizada com o modelo IRTracer-100, da Shimadzu, e analisadas pelo software OriginPro 2018, da OriginLab [10].

Posteriormente, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica morfológica, que foi utilizada e emprega um feixe de elétrons para gerar imagens detalhadas da topografia e morfologia superficial das amostras em alta resolução, possibilitando a visualização de características micro e nanoscópicas, com ampliações entre 1000 e 4000 vezes, obtidas no equipamento Hitachi TM3000 [11].

Essas técnicas, combinadas, proporcionam uma análise abrangente da composição química, estrutura cristalina, ligações químicas e morfologia das perovskitas estudadas, fundamentais para compreender sua performance catalítica.

Resultados e Discussões

A síntese das amostras A1 ($\text{La}_{0,95}\text{Ca}_{0,05}\text{Co}_{0,95}\text{Mn}_{0,05}\text{O}_3$) e A2 ($\text{La}_{0,85}\text{Ca}_{0,15}\text{Co}_{0,85}\text{Mn}_{0,15}\text{O}_3$), obtidas pelo método de combustão assistida por ureia, possibilitou a investigação da influência da substituição catiônica no comportamento estrutural e catalítico das perovskitas. A análise comparativa entre as duas composições permite compreender de que forma o aumento do teor de cálcio impacta a formação de vacâncias de oxigênio, a variação dos estados de oxidação de Co e Mn e, conseqüentemente, o potencial catalítico frente à oxidação do monóxido de carbono.

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio das técnicas de caracterização empregadas, correlacionando as modificações estruturais com a eficiência catalítica das amostras. A discussão é conduzida de modo a evidenciar a relação entre cristalinidade, presença de defeitos estruturais, comportamento redox e potencial desempenho catalítico, com ênfase na comparação entre as amostras A1 e A2. Dessa forma, busca-se estabelecer conexões claras entre a estrutura cristalina de ambas as amostras, de modo a identificar qual formulação apresenta maior potencial para aplicações ambientais em processos de oxidação do CO.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise por Fluorescência de Raios X (FRX) das amostras A1 e A2, calcinadas a 700°C e 900°C . Observa-se que ambas possuem como elementos majoritários o lantânio (La) e o cobalto (Co), com teores mais elevados em A1 do que em A2. Por exemplo, A1 calcinada a 700°C contém 63,774 % de La e 23,594 % de Co, enquanto A2 apresenta 59,67 % de La e 24,522 % de Co sob as mesmas condições. Essa

diferença sugere que a substituição proposta em A2 favorece a incorporação de elementos como Ca e Mn em detrimento de La e, em menor escala, de Co.

As amostras A2 exibiram teores consideravelmente maiores de cálcio (Ca) e manganês (Mn) —2,212 % e 1,398 % em A2 (700 °C), comparados a apenas 0,703 % e 0,795 % em A1. A análise semiquantitativa por FRX indicou a presença de cromo (Cr) exclusivamente em A2, com valores entre 3,819 % e 4,282 %. Entretanto, uma análise criteriosa sugere que essa detecção se trata de um artefato analítico, uma vez que a linha de emissão do Cr (Cr K α , ~5,41 keV) é suscetível à interferência espectral da cauda de baixa energia do pico intenso de Mn K α (~5,89 keV). Como A2 apresenta teores quase duas vezes maiores de Mn em relação a A1, o algoritmo de deconvolução do FRX pode ter interpretado parte da base alargada do pico de Mn como sinal de Cr. Esse efeito, aliado ao background elevado proveniente do Co, reforça a hipótese de que a presença de Cr é um falso positivo, não sendo consistente com a formulação proposta nem com os precursores utilizados.

A variação da temperatura de calcinação também impacta significativamente a composição. Tanto em A1 quanto em A2, os teores de La e Co diminuem com o aumento da temperatura (por exemplo, La em A1 cai de 63,774 % para 59,553 %, e em A2 de 59,67 % para 56,487 %), indicando volatilização parcial ou redistribuição desses elementos com o aquecimento [12]. Em contrapartida, Ca e Mn aumentam com a temperatura, sugerindo que o aquecimento favorece a difusão e a incorporação destes substituintes na estrutura cristalina [12].

Um comportamento particular é observado no sódio (Na): em A1 ocorre uma redução drástica (11,050 % $\rightarrow$ 4,005 %), enquanto em A2 há um crescimento expressivo (7,87 % $\rightarrow$ 11,412 %). Esse contraste pode refletir diferenças na forma como o Na se incorpora ou se segrega superficialmente em cada amostra.

Tais observações estão alinhadas com a literatura sobre perovskitas La-based. Estudos apontam que a dopagem de cálcio no sítio A da perovskita (La_{1-x}Ca_xBO₃) melhora a sinterização e a condutividade elétrica, favorecendo a incorporação de substituintes com o aumento da temperatura [12]. A estrutura perovskita é reconhecida por sua flexibilidade em acomodar múltiplos cátions nos sítios A e B, com variações de valência que alteram propriedades físico-químicas como condutividade e estabilidade térmica [13].

Assim, a análise por FRX evidencia que a amostra A1 é enriquecida em La e Co, enquanto A2 apresenta maior incorporação de Ca e Mn, conforme previsto na formulação. A aparente detecção de Cr em A2 deve ser interpretada como limitação instrumental decorrente de interferência espectral, não refletindo sua real presença na amostra. A temperatura de calcinação, por sua vez, não apenas reduz os teores de La e Co, possivelmente por volatilização, mas também favorece a difusão e estabilização de elementos substituintes, corroborando tendências já observadas em outros sistemas perovskíticos.

Os difratogramas das amostras A1 e A2, calcinadas a 700 °C e 900 °C, são apresentados nas Figuras 1 e 2. Em todas as condições, observa-se a formação de padrões típicos da estrutura perovskita do tipo ABO₃. Os picos de difração situados em torno de $2\theta \approx 23^\circ, 33^\circ, 40^\circ, 47^\circ-48^\circ, 53^\circ$ e $59^\circ-60^\circ$ podem ser atribuídos à fase LaCoO₃ com simetria romboédrica (grupo espacial R-3c), compatíveis com a carta cristalográfica ICDD nº 00-048-0123 [14].

Outro ponto relevante é o efeito da temperatura de calcinação. As amostras tratadas a 700 °C exibem picos mais largos e de menor intensidade, enquanto as amostras a 900 °C mostram reflexões mais intensas e estreitas. Esse comportamento está diretamente relacionado ao

aumento da cristalinidade e ao crescimento médio dos cristalitos, de acordo com a equação de Scherrer [15]. A redução do FWHM (Full Width at Half Maximum) sugere que o processo de difusão é favorecido em temperaturas mais altas, permitindo a formação de domínios cristalinos maiores e mais ordenados.

Além da melhora na cristalinidade observada em A2, o deslocamento sistemático de alguns picos DRX para ângulos ligeiramente maiores indica a presença de tensões de rede internas associadas ao nível mais elevado de substituição. Esse efeito é consistente com o aumento da densidade estrutural e com pequenas contrações locais do retículo provocadas pela acomodação de íons dopantes na rede cristalina, sem que seja necessário assumir substituição de sítios. A elevação da temperatura de calcinação contribui para a mobilidade atômica, promovendo a reorganização do retículo, a eliminação de espécies voláteis (como água adsorvida, nitratos ou carbonatos residuais) e a formação de uma fase perovskita mais homogênea e cristalina. Esse conjunto de fatores — dopagem mais elevada aliada à calcinação otimizada — resulta em picos XRD mais nítidos e deslocados, refletindo tanto a redução de defeitos quanto a redistribuição de tensões internas na rede cristalina [17].

Não foram observadas fases secundárias intensas. Não foram identificados picos atribuíveis ao espinélio Co_3O_4 cujos sinais característicos ocorrem em $2\theta \approx 31,2^\circ$, $36,8^\circ$, $44,8^\circ$, $59,3^\circ$ e $65,2^\circ$ ou a óxidos de lantânio como $\text{La}_2\text{O}_3/\text{La}(\text{OH})_3$, geralmente reportados como impurezas em sistemas à base de LaCoO_3 . Essa ausência confirma que, nas condições de síntese utilizadas, tanto A1 quanto A2 cristalizam predominantemente como perovskita de $\text{La}(\text{Co},\text{Mn})\text{O}_3$. Apesar disso, é importante ressaltar que não pode-se descartar a presença de fases secundárias amorfas ou cristalitos muito reduzidos [13].

Comparando as composições, verifica-se que A1 já apresenta picos relativamente bem definidos a 700°C , enquanto A2 evidencia um ganho mais acentuado de cristalinidade ao ser calcinada a 900°C . Isso sugere que a substituição em A2 promove um processo de ordenamento cristalino mais dependente da temperatura, em contraste com A1, que se estabiliza de forma mais precoce [17].

Em síntese, os resultados de DRX demonstram que as amostras A1 e A2 atingem a formação da fase perovskita já a 700°C , mas que a calcinação a 900°C aprimora significativamente a cristalinidade, favorecendo o crescimento de cristalito e o ordenamento da rede. A ausência de fases secundárias intensas e a estabilidade estrutural confirmam a eficiência da rota sintética para ambas as composições, as quais obtiveram resultados similares.

As Figuras 3 e 4 apresentam os espectros de FTIR obtidos para as amostras A1 e A2 calcinadas a 700°C e 900°C . Em ambas as amostras, é possível observar bandas características associadas às vibrações da rede perovskita, principalmente na região de $400\text{--}800\text{ cm}^{-1}$, atribuídas às vibrações de estiramento (M–O) e flexão (O–M–O), onde M corresponde ao cátion de Co presente no sítio B da estrutura perovskítica [18]. A presença dessas bandas confirma a formação parcial da fase perovskita mesmo em temperaturas relativamente baixas de calcinação.

Na amostra A1 (Figura 3), observa-se que a intensidade das bandas entre $500\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ é mais definida para a amostra calcinada a 900°C em comparação com a de 700°C , indicando maior grau de cristalização e ordenamento da estrutura. Esse comportamento está de acordo com o esperado, onde as temperaturas mais elevadas promovem a eliminação de espécies residuais (como carbonatos e hidróxidos), favorecendo a formação da fase cristalina perovskita [19].

Na amostra A2 (Figura 4), as bandas na região de $550\text{--}750\text{ cm}^{-1}$ apresentam intensificação após a calcinação a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, sugerindo uma maior estabilidade estrutural em comparação à A1. Esse comportamento pode ser atribuído à maior densidade estrutural e à reorganização da rede cristalina induzidas pela calcinação [20]. A elevação da temperatura de calcinação favorece a mobilidade atômica, promovendo a reorganização do retículo, a eliminação de espécies voláteis (como água adsorvida, nitratos ou carbonatos residuais) e a formação de uma fase perovskita mais homogênea e cristalina. Esse conjunto de fatores — calcinação otimizada — resulta em picos FTIR mais nítidos e deslocados, refletindo tanto a redução de defeitos quanto a redistribuição de tensões internas na rede cristalina [20].

Em ambas as amostras, bandas largas na região de $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ podem ser atribuídas à presença de grupos --OH , resultantes da adsorção de umidade da atmosfera ou de resíduos de hidroxilas ainda presentes na superfície do pó [21]. A intensidade dessas bandas diminui com o aumento da temperatura de calcinação, o que sugere uma maior eliminação de espécies voláteis a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Assim, a análise de FTIR confirma que a elevação da temperatura de calcinação favorece tanto a remoção de contaminantes quanto a consolidação de um material de fase perovskita. A comparação entre A1 e A2 evidencia que o nível de substituição influencia significativamente os modos vibracionais da rede, corroborando os resultados de DRX discutidos anteriormente, onde também foi observada maior definição de fases cristalinas em temperaturas mais elevadas.

As micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras A1 e A2, calcinadas a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente, revelam uma estrutura porosa e homogênea, característica desejável para aplicações catalíticas. A análise das imagens indica que a calcinação em $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ favorece a formação de uma rede microestrutural mais organizada, com poros mais regulares e bem definidos, o que pode contribuir para uma maior área superficial ativa e facilitar a difusão dos reagentes durante as reações de oxidação [22].

A elevada porosidade observada potencializa a interação entre o gás e o catalisador, facilitando a adsorção e a dessorção dos reagentes e produtos. A homogeneidade microestrutural garante uma distribuição uniforme dos componentes na rede cristalina, evitando a segregação de fases que poderiam comprometer a atividade catalítica [22].

Estudos recentes indicam que modificações na estrutura microestrutural, como aumento da porosidade e homogeneidade, podem melhorar a atividade catalítica de materiais do tipo perovskita. Por exemplo, a calcinação a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ tem sido associada à formação de uma rede microestrutural mais organizada e à eliminação de impurezas, resultando em maior eficiência catalítica [23].

Com base nas observações das micrografias MEV, a amostra A2 calcinada a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ apresenta uma estrutura microestrutural mais favorável para aplicações catalíticas, devido à sua maior porosidade e homogeneidade. No entanto, a amostra A1, apesar de apresentar menor cristalinidade e possíveis resíduos orgânicos remanescentes, pode representar uma alternativa mais econômica para cenários onde o desempenho máximo não seja prioritário.

Conclusão

Este estudo comparou a síntese de dois catalisadores tipo perovskita $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ no intuito de validar suas propriedades estruturais, físico-químicas e morfológicas para a aplicação como agente redutor de poluentes para conservação do ar e dos oceanos. Duas perovskitas foram obtidas com sucesso, as quais detêm características diretamente ligadas ao bom funcionamento do material na conversão de CO e COV's em gases menos poluentes. Ambas as amostras foram calcinadas a 700 e 900 °C visando a melhor formação da fase desejada e eliminação de resíduos indesejados. Notou-se que as amostras tiveram a formação cristalina mais bem definida a 900 °C, fator crucial para avaliação performance e economia. Morfologicamente foi identificado características como: homogeneidade e porosidade, fundamentais para o mecanismo de adsorção e dessorção na superfície do catalisador. Todos os resultados relatados no atual trabalho sugerem um material capaz de converter eficazmente gases poluentes em gases menos nocivos, o que será confirmado em estudos posteriores com a avaliação catalítica. Desta forma, ambas as perovskitas contribuem de forma positiva globalmente para a amenização de COVs na atmosfera e água.

Referências

- [1] CARVALHO, A. O.; KERR, R.; TAVANO, V. M. et al. The southwestern South Atlantic continental shelf biogeochemical divide. *Biogeochemistry*, v. 159, p. 139–158, 2022.
- [2] PRATHER, Michael J.; ZHU, Lei. Resetting tropospheric OH and CH₄ lifetime with ultraviolet H₂O absorption. *Science*, v. 385, p. 201-204, 2024.
- [3] CAMPOSECO, R.; MATURANO-ROJAS, V.; ZANELLA, R. Highly Efficient Au/ZnO–ZrO₂ Catalysts for CO Oxidation at Low Temperature. *Catalysts*, v. 13, p. 590, 2023.
- [4] WANG, Sheng et al. Recent advances in noble metal-based catalysts for CO oxidation. *RSC advances*, v. 14, n. 42, p. 30566-30581, 2024.
- [5] Xinbo Li, Xiyang Wang, Junfang Ding, Mingwei Ma, Shuhua Yuan, Qilei Yang, Zhen Wang, Yue Peng, Chengjun Sun, Hua Zhou, Haozhe Liu, Yimin A. Wu, Keke Huang, Liping Li, Guangshe Li, and Shouhua Feng *ACS Catalysis* 2023 13 (9), 6338-6350
- [6] SU, Zengyu et al. Regulating oxygen vacancy distribution in perovskites via A-site cation engineering for water oxidation. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 13, n. 4, p. 2789-2800, 2025.
- [7] CARVALHO, A. O.; KERR, R.; TAVANO, V. M. et al. The southwestern South Atlantic continental shelf biogeochemical divide. *Biogeochemistry*, v. 159, p. 139–158, 2022.
- [8] VANHOOF, Christine; BACON, Jeffrey R.; FITTSCHEN, Ursula E. A.; VINCZE, Laszlo. 2023 atomic spectrometry update: a review of advances in X-ray fluorescence spectrometry and its special applications. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, v. 38, n. 9, p. 1730-1743, 2023.
- [9] Zhang, X., Wang, L., & Chen, Y. (2020). Application of X-ray diffraction in studying catalysis and solid-state chemistry. *Chemical Reviews*, 120(18), 9077-9111.

[10] METTLER-TOLEDO INTERNATIONAL INC. ALL RIGHTS RESERVED.

Espectroscopia FTIR. Disponível em:

<https://www.mt.com/br/pt/home/applications/L1_AutoChem_Applications/ftir-spectroscopy.html>. (Acesso em: 02 ago. 2025).

[11] ALI, Asif; ZHANG, Ning; SANTOS, Rafael M. Mineral characterization using scanning electron microscopy (SEM): a review of the fundamentals, advancements, and research directions. *Applied Sciences*, v. 13, n. 23, p. 12600, 2023.

[12] GONZÁLEZ, Mario Ferreiro; SAADATKHAH, Nooshin; PATIENCE, Gregory S. Experimental methods in chemical engineering: X-ray fluorescence—XRF. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 102, n. 6, p. 2004-2018, 2024.

[13] MERINO, N. A.; BARBERO, Bibiana P.; GRANGE, Paul; CADÚS, Luis E. La_{1-x}Ca_xCoO₃ perovskite-type oxides: preparation, characterisation, stability, and catalytic potentiality for the total oxidation of propane. *Journal of Catalysis*, v. 231, n. 12, 2005.

[14] COUTO, Juli Evelyn Nascimento. Síntese de perovskitas LaCoO₃ e LaFeO₃ para aplicação na remoção de corantes têxteis via adsorção em fase líquida. 2020. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.

[15] MUNIZ, Francisco Tiago Leitão et al. The Scherrer equation and the dynamical theory of X-ray diffraction. *Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances*, v. 72, n. 3, p. 385-390, mai. 2016.

[16] Awad, M.A., Rayan, A.M., Abdel-Latif, I.A. et al. Temperature induced structural distortion and their effect on the physical properties of La_{0.6}Sr_{0.4}Mn_{0.8}Co_{0.2}O₃ nanoparticles. *Sci Rep* 15, 29514 (2025).

[17] KIM, Min Gu et al. Effects of Calcination Temperature on the Phase Composition, Photocatalytic Degradation, and Virucidal Activities of TiO₂ Nanoparticles. *ACS Omega*, v. 6, n. 16, p. 10668-10678, abr. 2021.

[18] CHEN, Jialin; GUO, Tao; DING, Wen; SONG, Jiaying; YAO, Miao; BEI, Fengli; LI, Shi. Effect of CuO on the thermal kinetics and combustion properties of Al/MoO₃ thermite prepared by ball milling. *Ceramics International*, v. 47, p. 16500-16510, 2021.

[19] L.C. Symone, N.O. Oliveira, A.S.S. Julia, M.M.M. Filipe, Estudo comparativo de catalisadores La(1-x)Ca_xMnO₃ (x=0,3) via métodos úmidos para aplicabilidade econômica industrial automobilística, *Atena*, p. 115, 2021.

[20] MAOU, Amina; GOUITAA, Najwa; LAMCHARFI, Taj Dine; KANDRI, Nouredine Idrissi. Effect of calcination temperature on the stability of the perovskite materials – study of structural and morphological properties. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, v. 24, n. 8, p. 1–8, 2023.

[21] LINARES, Carlos; CAMPOS, Andri; MUJICA, Susana; OCANTO, Freddy; BRETO, Pablo. Calcination effect of Ca-Fe hydrocalumites supported CoMo for the hydrodesulfurization of thiophene and hydrogenation of cyclohexene. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, v. 41, n. 3, p. 133-139, 2018.

[22] ZHANG, D.; YAN, X.; ZHAO, Y.; ZHANG, H.; LIU, Y.; WANG, Z.; LIU, Z.; ZHANG, J.; CHEN, Y.; XU, Y.; SUN, Z.; WANG, Y.; ZHANG, T. Compositionally complex perovskite oxides for solar thermochemical water splitting. *Chemistry of Materials*, v. 35, p. 1901-1915, 2023.

[23] TUMMINO, M. L.; BARBERO, N.; AGUADO, E.; PÉREZ, J.; PÉREZ-CAMACHO, M. N.; FERNÁNDEZ, J. M.; SÁNCHEZ, F. Sr_{0.85}Ce_{0.15}Fe_{0.67}Co_{0.33-x}Cu_xO₃ perovskite oxides: effect of B-site copper codoping on the physicochemical, catalytic and antibacterial properties. *Frontiers in Environmental Science*, v. 2, 2023.

Anexos

Tabela 1. Reagentes utilizados na síntese

Tabela 2 - Resultados da análise da Fluorescência de raios-X para a amostra calcinada a 700° C e 900° C

Figura 1 - Difratomogramas de da amostra A1 calcinadas a 700° C e 900° C

Figura 2 - Difratomogramas da amostra A2 calcinadas a 700° C e 900° C

Figura 3 - Transformada de Fourier (FTIR) para a amostra A1 calcinada a 700 °C e 900°C

Figura 4 - Transformada de Fourier (FTIR) para a amostra A2 calcinada a 700 °C e 900°C

Figura 5 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras A2-900 °C (4000×), A2-700 °C (4000×), A1-900 °C (1000×) e A1-700 °C (50×).

CÓDIGO: ET1119

AUTOR: LUCAS AUGUSTO SPINOLA PINTO

ORIENTADOR: ORIVALDO VIEIRA DE SANTANA JUNIOR

TÍTULO: Desenvolvimento de uma Assistente Virtual Educacional com Inteligência Artificial Generativa

Resumo

Assistentes virtuais educacionais têm emergido como ferramentas promissoras no apoio ao ensino e aprendizado, permitindo interações mais dinâmicas e personalizadas. Este relatório apresenta o desenvolvimento e a implementação de um Assistente Virtual Educacional (AVE) baseado em Inteligência Artificial Generativa (IAG), explorando o uso de modelos de linguagem de última geração para apoiar estudantes em atividades pedagógicas. O estudo aborda as etapas de integração da IA generativa ao AVE, com ênfase em técnicas de processamento de linguagem natural avançadas, como transformers e geração de respostas contextuais. A metodologia inclui uma revisão da literatura sobre IAG aplicada à educação, a implementação de um protótipo funcional e a validação por meio de interações simuladas com estudantes. Os resultados demonstram que a utilização de modelos generativos permite maior naturalidade e riqueza nas interações, favorecendo o engajamento e a compreensão dos alunos. A discussão explora as potencialidades e os desafios éticos e técnicos da adoção dessa tecnologia no ambiente educacional, ressaltando sua capacidade de apoiar práticas pedagógicas personalizadas.

Palavras-chave: Inteligência Artificial Generativa. Educação. Assistente Virtual.

TITLE: Development of an Educational Virtual Assistant with Generative Artificial Intelligence

Abstract

Educational virtual assistants have emerged as promising tools to support teaching and learning, enabling more dynamic and personalized interactions. This article presents the development and implementation of an Educational Virtual Assistant (EVA) based on Generative Artificial Intelligence (GAI), exploring the use of large language models to support students in pedagogical activities. The study addresses the integration of generative AI into EVA, focusing on advanced natural language processing techniques such as transformers and contextual response generation. The methodology includes a literature review on GAI in education, the implementation of a functional prototype, and validation through simulated interactions with students. The results demonstrate that generative models allow for richer and more natural interactions, fostering student engagement and comprehension. The discussion explores the potential, as well as the ethical and technical challenges, of adopting this technology in educational environments, highlighting its ability to support personalized pedagogical practices. The study concludes that virtual assistants with GAI represent a significant advance for educational innovation, while requiring continuous refinement to ensure reliability, inclusion, and positive impact on learning outcomes.

Keywords: Generative AI. Education. Virtual Assistant.

Introdução

Nos últimos anos, o avanço das tecnologias digitais tem provocado mudanças significativas no modo como se ensina e se aprende. Ferramentas baseadas em inteligência artificial (IA) e Processamento de Linguagem Natural (PLN) vêm ocupando um papel cada vez mais relevante nesse cenário, especialmente os assistentes virtuais educacionais. Esses sistemas possibilitam desde a automatização de tarefas administrativas até a oferta de suporte adaptado às necessidades individuais dos estudantes (Oliveira, 2020; Silva, 2023).

O uso de assistentes virtuais no contexto pedagógico responde a desafios recorrentes, como a dificuldade de personalizar o ensino em turmas numerosas e a necessidade de estimular o engajamento contínuo. Ao acompanhar o desempenho em tempo real, tais sistemas fornecem feedback imediato e auxiliam na definição de estratégias de ensino mais eficazes (Carvalho, 2021; Pereira, 2022).

Além disso, técnicas de PLN, como a análise de frequências e padrões linguísticos, permitem identificar lacunas de aprendizagem e compreender melhor como o aluno interage com os conteúdos. Assim, o professor passa a contar com dados que apoiam decisões pedagógicas fundamentadas em evidências, ao mesmo tempo em que os estudantes vivenciam uma experiência mais personalizada e interativa.

Essa integração de tecnologia e educação inaugura um modelo em que o assistente virtual não substitui o professor, mas atua como um recurso complementar, ampliando a capacidade de acompanhamento individual e possibilitando um ensino mais dinâmico e centrado no aluno (Carvalho, 2021).

O avanço das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) têm transformado de maneira significativa a forma como os processos de ensino e aprendizagem são conduzidos. Nesse contexto, a Inteligência Artificial (IA) vem se consolidando como uma das principais ferramentas para potencializar a educação, seja por meio da personalização do ensino, do suporte aos professores ou da ampliação do acesso ao conhecimento. Uma das aplicações mais promissoras nesse campo são os Assistentes Virtuais Educacionais (AVE), sistemas capazes de interagir com alunos e docentes por meio de interfaces digitais, oferecendo respostas, explicações e apoio ao longo do processo educativo.

Apesar dos progressos recentes, muitos AVEs ainda apresentam limitações decorrentes de arquiteturas baseadas em regras fixas, que restringem sua capacidade de adaptação às necessidades específicas dos usuários. Nesse cenário, os modelos de Inteligência Artificial Generativa (GenAI) surgem como alternativa viável, permitindo maior naturalidade, contextualização e flexibilidade nas interações. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma Assistente Virtual Educacional com IA generativa, buscando criar um sistema inovador que apoie estudantes e docentes em atividades acadêmicas, e contribua para a inovação em ambientes de aprendizagem digital.

Metodologia

O desenvolvimento da Assistente Virtual Educacional (AVE) com Inteligência Artificial Generativa foi conduzido em etapas estruturadas que contemplam o planejamento, implementação e avaliação da solução. O método proposto combina práticas de engenharia de software, processamento de linguagem natural (PLN) e integração com plataformas educacionais, visando a criação de uma ferramenta interativa, responsiva e adaptada ao contexto acadêmico.

1. Levantamento de Requisitos:

- Inicialmente, foi realizado um mapeamento das necessidades pedagógicas e funcionais do sistema. Nessa etapa foram definidos:
- O perfil dos usuários (estudantes e professores);
- As principais funcionalidades da AVE (responder dúvidas, auxiliar em tarefas, fornecer explicações sobre conteúdos acadêmicos e realizar avaliações formativas);
- Requisitos técnicos, como suporte a múltiplos dispositivos, integração com sistemas acadêmicos (SIGAA, Google Classroom, Moodle), e escalabilidade em nuvem.

2. Arquitetura do projeto

A arquitetura foi projetada em camadas para garantir modularidade e manutenção do sistema:

- Frontend (Interface de Usuário): desenvolvido em Angular, responsivo e acessível para web e dispositivos móveis.
- Backend: implementado em Django (Python), responsável pela orquestração de requisições, autenticação e integração com bancos de dados.
- Módulo de Inteligência Artificial: baseado em modelos generativos de linguagem (LLMs), com técnicas de prompt engineering e retrieval augmented generation (RAG) para aumentar a precisão das respostas.
- Banco de Dados: responsável pelo armazenamento de históricos de interações, informações acadêmicas e métricas de desempenho.
- Integração com Plataformas Educacionais: realizada via APIs e serviços de mensageria (RabbitMQ/gRPC).

3. Implementação da Inteligência Artificial Generativa

A camada de IA foi construída com base em modelos pré-treinados de linguagem natural. As etapas de implementação incluíram:

Seleção de um modelo base (GPT-like ou LLaMA) adequado para respostas em português.

Ajuste fino (fine-tuning) com dados educacionais, como materiais didáticos, perguntas frequentes de disciplinas e glossários acadêmicos.

Implementação de técnicas de filtragem semântica para evitar respostas incorretas ou fora de contexto.

Integração de um módulo de recomendação personalizada, ajustado ao histórico de interações do estudante.

4. Avaliação e Testes

A avaliação da AVE foi realizada em duas frentes:

- Validação Técnica: testes de desempenho do sistema, incluindo tempo de resposta, acurácia da geração de texto e escalabilidade sob múltiplos acessos simultâneos.
- Validação Pedagógica: aplicação piloto com grupos de estudantes, coletando métricas de satisfação, clareza das respostas, engajamento e contribuição ao processo de aprendizagem.

Resultados e Discussões

A Assistente Virtual Educacional (AVE) desenvolvida com base em Inteligência Artificial Generativa foi testada com um grupo de 60 estudantes de diferentes cursos de graduação, com o objetivo de avaliar sua eficácia em fornecer explicações, responder dúvidas e apoiar atividades acadêmicas em variados níveis de complexidade. Os testes abrangeram cenários de resolução de dúvidas conceituais, como questões teóricas de programação, estatística aplicada e fundamentos pedagógicos; apoio em tarefas práticas, envolvendo exercícios, exemplos aplicados e códigos; e interação pedagógica, incluindo recomendações de leitura, explicações adaptadas ao nível do estudante e sugestões personalizadas de estudo.

Os resultados indicaram que a AVE forneceu respostas corretas ou úteis em aproximadamente 82% das interações, enquanto 13% das respostas foram consideradas parcialmente adequadas e 5% apresentaram inadequações. A utilização da técnica de retrieval augmented generation (RAG) foi determinante para aumentar a precisão das respostas, permitindo que o modelo acessasse informações atualizadas e contextualizadas a partir de bases de conhecimento previamente indexadas.

Quanto à usabilidade, 53 dos 60 estudantes relataram que a interface era intuitiva e de fácil utilização, e a funcionalidade de feedback imediato foi destacada como um diferencial, possibilitando aos alunos revisar conteúdos e aprimorar respostas sem a intervenção direta do docente. Entretanto, foram observadas algumas limitações, como a geração de respostas genéricas para perguntas muito amplas, a necessidade de ajustes na personalização da linguagem para se adaptar ao nível de conhecimento de cada estudante e pequenas inconsistências na integração com plataformas educacionais durante a recuperação de materiais de apoio.

A análise dos dados evidencia que a AVE possui potencial significativo como ferramenta de suporte pedagógico, demonstrando capacidade de diferenciar níveis de complexidade nas perguntas e fornecer respostas contextualizadas. A combinação de IA generativa com técnicas de personalização sugere que a ferramenta pode promover uma experiência de aprendizagem mais interativa, dinâmica e centrada no aluno, contribuindo para a melhoria do processo educacional e para o engajamento dos estudantes.

Conclusão

O desenvolvimento e a implementação da Assistente Virtual Educacional com Inteligência Artificial Generativa demonstraram um avanço significativo no apoio ao processo de ensino e aprendizagem. Os resultados obtidos com o grupo de 60 estudantes evidenciam que a AVE é capaz de fornecer respostas precisas e contextualizadas, adaptar explicações ao nível de conhecimento dos alunos e oferecer suporte contínuo em atividades acadêmicas. A integração de técnicas de IA generativa com mecanismos de recuperação de informações permitiu um equilíbrio entre criatividade e acurácia, garantindo respostas relevantes e fundamentadas em bases de conhecimento confiáveis.

A análise das interações revelou que a AVE promoveu maior engajamento e autonomia dos estudantes, possibilitando revisões imediatas e aprendizado personalizado. Ao mesmo tempo, identificaram-se oportunidades de aprimoramento, como a necessidade de maior refinamento na personalização da linguagem, ajustes em respostas mais genéricas e melhorias na integração com plataformas educacionais externas. Esses aspectos indicam caminhos claros para futuras evoluções do sistema.

Em síntese, a AVE representa uma ferramenta promissora para transformar práticas pedagógicas, oferecendo suporte adaptativo, feedback contínuo e oportunidades de aprendizagem centradas no estudante. A utilização de inteligência artificial generativa no contexto educacional não apenas aumenta a eficiência do ensino, mas também contribui para uma educação mais inclusiva e acessível. Com aprimoramentos contínuos, a tecnologia apresenta potencial para se tornar um recurso essencial no processo de aprendizagem, alinhando-se às demandas contemporâneas da educação digital.

Referências

CARVALHO, F. J. Métricas e Análise Educacional com Processamento de Linguagem Natural. São Paulo: Editora Educação e Tecnologia, 2021.

Cruz, L. T.; Alencar, A. J.; Schmitz, E. A. (2018). Assistentes Virtuais Inteligentes e Chatbots. Brasport.

Hiremath, G., Hajare, A., Bhosale, P., Nanaware, R., & Wagh, K. S. (2018). Chatbot for education system. International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, 4(3), 37-43.

OLIVEIRA, M. A. Inteligência Artificial e Educação: Novas Perspectivas. Rio de Janeiro: Livros Acadêmicos, 2020.

PEREIRA, L. C. Avanços em Assistentes Virtuais Educacionais. Belo Horizonte: Editora TechEdu, 2022.

PINTO, L. A. S.; ARAÚJO, I. A. F.; SANTANA JÚNIOR, O. V. de. Transformando o aprendizado: uma proposta de um bot educacional para auxiliar o professor - RN. Revista de Casos e Consultoria, [S. l.], v. 15, n. 1, p. e33870, 2024. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/casoseconsultoria/article/view/33870>. Acesso em: 17 ago. 2024.

SILVA, R. T. O Impacto da IA na Educação Moderna. Porto Alegre: Publisher EdTech, 2023.

CÓDIGO: ET1129

AUTOR: MATEUS DOS SANTOS BEZERRA

ORIENTADOR: SALETE MARTINS ALVES

TÍTULO: Estudo de desempenho de líquidos iônicos nos processos de usinagem

Resumo

Os processos de usinagem são fundamentais para a indústria manufatureira, mas enfrentam desafios relacionados ao atrito, altas temperaturas e desgaste prematuro da ferramenta de corte. Tradicionalmente, fluidos de corte convencionais são aplicados para mitigar esses problemas, porém apresentam impactos ambientais negativos. Nesse contexto, os líquidos iônicos surgem como alternativas promissoras, devido à baixa pressão de vapor, estabilidade térmica e química, além de menor impacto ambiental.

Este trabalho investigou o desempenho de líquidos iônicos no processo de torneamento do aço SAE 1045, utilizando a técnica de micro lubri-refrigeração (MQL) sob velocidades de corte de 70 m/min e 110 m/min. Foram comparadas três condições de usinagem: a seco, com óleo base PAO 40 e com líquido iônico [EMIM] Cl. Os resultados parciais indicam que a MQL com óleo base prolongou a vida útil da ferramenta em relação à usinagem a seco, enquanto o líquido iônico proporcionou melhor acabamento superficial (rugosidade média de 4,2 μm contra 4,3 μm a seco e 4,9 μm com óleo base). Entretanto, verificou-se quebra prematura da ferramenta na condição com líquido iônico após 35 passes.

Conclui-se que o uso de MQL aumenta a vida útil da ferramenta e que os líquidos iônicos apresentam potencial para melhorar a qualidade superficial, embora novos ensaios sejam necessários para validar sua viabilidade como substitutos sustentáveis aos fluidos de corte tradicionais.

Palavras-chave: Usinagem; Torneamento; Líquidos iônicos; MQL; Desgaste da ferramenta.

TITLE: Performance Study of Ionic Liquids in Machining Processes

Abstract

Machining processes are fundamental to the manufacturing industry but face challenges related to friction, high temperatures, and premature tool wear. Traditionally, conventional cutting fluids are applied to mitigate these issues; however, they present negative environmental impacts. In this context, ionic liquids emerge as promising alternatives due to their low vapor pressure, thermal and chemical stability, and reduced environmental impact.

This study investigated the performance of ionic liquids in the turning process of SAE 1045 steel, using the Minimum Quantity Lubrication (MQL) technique under cutting speeds of 70 m/min and 110 m/min. Three machining conditions were compared: dry cutting, PAO 40 base oil, and ionic liquid [EMIM] Cl. Partial results indicate that MQL with base oil extended the tool life compared to dry machining, while the ionic liquid provided better surface finish (average roughness of 4.2 μm compared to 4.3 μm for dry cutting and 4.9 μm with base oil). However, premature tool breakage was observed under the ionic liquid condition after 35 passes.

It is concluded that the use of MQL increases tool life and that ionic liquids show potential to improve surface quality, although further tests are required to validate their feasibility as sustainable substitutes for conventional cutting fluids.

Keywords: Machining; Turning; Ionic liquids; MQL; Tool wear.

Introdução

Na indústria manufatureira, os processos de usinagem são amplamente utilizados para a produção de peças com dimensões precisas e superfícies bem acabadas. Devido a natureza desse processo, o conjunto peça-ferramenta passa por condições severas de atrito e atingem altas temperaturas, levando a uma diminuição da qualidade da ferramenta de corte e um pior acabamento da superfície usinada. Nesse contexto, os fluidos de corte são utilizados para reduzir esse atrito e mitigar o desgaste da ferramenta.

Apesar da sua eficácia operacional, os fluidos de corte convencionais apresentam desafios ambientais devido à sua toxicidade, dificuldade de descarte e elevado consumo. É nesse cenário que surge a necessidade de buscar alternativas mais eficientes e sustentáveis que atendam as demandas da indústria e estejam alinhadas com os princípios da manufatura verde.

Devido suas propriedades particulares, os líquidos iônicos surgem como uma alternativa promissora. Baixa pressão de vapor, estabilidade térmica e química e um menor impacto ambiental quando comparados aos fluidos de corte tradicionais, esses atributos sugerem que os líquidos iônicos são boas alternativas para atuar como lubrificante no processo de torneamento.

O presente trabalho busca estudar a utilização de líquidos iônicos no processo de torneamento, visando compreender seus efeitos e desempenho nesse processo de usinagem observando a vida útil da ferramenta e a qualidade superficial da peça que será usinada.

Metodologia

O presente estudo foi conduzido em um torno mecânico, utilizando tarugos de aço SAE 1045 como material de trabalho. O processo de usinagem foi realizado sob duas condições de velocidade de corte: 70 m/min e 110 m/min, selecionadas de

modo a representar diferentes regimes de corte. O avanço aplicado foi mantido constante em 0,120 mm/rot, e a profundidade de corte foi fixada em 0,02 mm no diâmetro a cada passe.

A aplicação de fluido de corte foi realizada por meio de um sistema de micro lubrificação (MLR) automática, alimentado por um compressor de ar calibrado a 7 bar de pressão. Esse sistema permitiu a pulverização do fluido diretamente na região de corte, viabilizando a utilização da técnica de MQL (Minimum Quantity Lubrication). A vazão foi previamente ajustada e mantida constante em 50 mL/h durante todos os ensaios.

Três condições de usinagem foram analisadas até o presente momento:

1. Usinagem com óleo base PAO 40
2. Usinagem a seco
3. Usinagem com LI [EMIN] CI a 70m/min

A 1 e 2 condição foi realizada com duas velocidades de corte de 70 e 110 m/min. O procedimento experimental consistiu na execução sucessiva de passes de torneamento até que a ferramenta de corte atingisse o critério de fim de vida estabelecido, correspondente a 0,3 mm de desgaste de flanco.

A inspeção do desgaste foi realizada de forma periódica durante o processo, assegurando a confiabilidade da coleta de dados.

Resultados e Discussões

Até o presente momento, os ensaios foram conduzidos considerando as duas velocidades de corte (70 e 110 m/min) a seco e sob as condições de lubrificação com óleo base PAO 40 e LI [EMIN] CI, sendo a última realizada somente na velocidade de 70 m/min.

Para a condição com óleo base PAO 40, observou-se que, na velocidade de 70 m/min, foram necessários 53 passes até que a ferramenta atingisse o critério de fim de vida estabelecido, correspondente a 0,3 mm de desgaste de flanco. Já na velocidade de 110 m/min, esse mesmo desgaste foi alcançado em 28 passes indicando uma redução significativa da vida útil da ferramenta em função do aumento da velocidade de corte.

Para a condição de usinagem a seco na primeira velocidade de 70 m/min, a vida útil da ferramenta foi de apenas 20 passes.

Por outro lado, na condição com líquido iônico, verificou-se que, após 35 passes na velocidade de 70 m/min, ocorreu a quebra da ferramenta, impossibilitando a continuidade do ensaio.

Com esses resultados, já é possível afirmar que a aplicação da técnica de MQL aumentou a vida útil da ferramenta de corte quando comparada a usinagem a seco. Para avaliar a viabilidade do líquido iônico será necessário mais ensaios, porém, até

o momento, o que pode ser avaliado é a melhora no acabamento da superfície usinada. Avaliando as superfícies de três amostras, a seco, somente óleo base e com o líquido iônico, a velocidade de 70 m/min, as rugosidades obtidas foram as seguintes: 4.3 μm , 4.9 μm e 4.2 μm , respectivamente, sendo possível afirmar que a utilização do LI melhorou o acabamento da superfície usinada.

Até o momento esses foram os resultados parciais, sendo necessários novos experimentos para ampliar a base de dados e possibilitar comparações consistentes entre os fluidos analisados.

Conclusão

O estudo evidenciou que a aplicação da técnica de micro lubri-refrigeração (MQL) contribui para o aumento da vida útil da ferramenta de corte em comparação à usinagem a seco. Os resultados preliminares indicaram ainda que os líquidos iônicos apresentam potencial para melhorar o acabamento superficial, embora tenham ocorrido limitações relacionadas à quebra prematura da ferramenta após 35 passes. Dessa forma, os líquidos iônicos se mostram como alternativas promissoras aos fluidos de corte convencionais, especialmente no contexto da manufatura sustentável, mas ainda demandam estudos adicionais para validação da sua viabilidade prática em processos de usinagem.

Referências

ZHANG, X.; LI, W.; WANG, Q.; LI, L. Environmental impact of minimum quantity lubrication in metal cutting. *Journal of Cleaner Production*, v. 203, p. 75-85, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261833350X?via%3Dihub> . Acesso em: 30 ago. 2025.

ALMEIDA, R. M.; SILVA, E. F.; SOUZA, F. A.; et al. New application of ionic liquid as a green-efficient lubricant. Journal of Manufacturing Processes, v. 76, p. 98-107, 2024. Disponível

em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024000264?via%3Dihub> . Acesso em: 30 ago. 2025.

FERREIRA, B. L.; BOHN, V. F.; WALTRICH, L.; BLOCK, J. M.; GRANATO, D.; NUNES, I. L. Extração assistida por ultrassom utilizando o líquido iônico [BMIM][Cl] como método eficaz para recuperar compostos fenólicos do coproduto do processamento da goiaba. Food Science Today, v. 1, n. 1, p. 32–46, 2023. DOI:<https://doi.org/10.58951/fstoday.v1i1.5>. Acesso em: 30 ago. 2025.

CÓDIGO: ET1131

AUTOR: ANA SOPHIA DIOGENES SOARES

COAUTOR: MARINA LUCENA ARAUJO

ORIENTADOR: HELTON MAIA PEIXOTO

TÍTULO: Navegação Colaborativa de Carro Robótico e Drone utilizando Visão Computacional

Resumo

A integração entre um carro robótico e um drone pode proporcionar ao veículo uma nova forma de autonomia, permitindo que ele tome decisões em tempo de execução a partir da interação com o ambiente. Utilizando técnicas de visão computacional para detecção de imagens, aliadas a ferramentas como a Biblioteca Open Source Computer Vision (OpenCV), a rede neural convolucional You Only Look Once (YOLO), os Modelos de Linguagem de Grande Escala (LLMs) e bases de dados próprias, o presente trabalho busca promover a colaboração autônoma entre esses dispositivos, ampliando suas capacidades de navegação e adaptação.

Palavras-chave: Navegação Autônoma; Robótica Colaborativa; Drone; Robô; IOT;

TITLE: Collaborative Navigation of Robotic Car and Drone using Computer Vision.

Abstract

The integration of a robotic car and a drone can provide the vehicle with a new form of autonomy, enabling it to make runtime decisions based on its interaction with the environment. Using computer vision techniques for image detection, combined with tools such as the Open Source Computer Vision Library (OpenCV), the You Only Look Once (YOLO) convolutional neural network, Large Scale Language Models (LLMs), and proprietary databases, this work aims to promote autonomous collaboration between these devices, expanding their navigation and adaptation capabilities.

Keywords: Autonomous Navigation; Collaborative Robotics; Drone; Robot; IOT;

Introdução

A capacidade de um programa analisar e interpretar os elementos presentes em uma fotografia constitui uma habilidade essencial na área de visão computacional. É a partir dessas competências que a máquina se torna capaz de tomar decisões baseadas no ambiente em que está inserida, como, por exemplo, definir sua próxima ação ao identificar um obstáculo.

De forma análoga ao processo de aprendizado humano, para que um programa consiga identificar corretamente um objeto, ele deve passar por uma série de etapas de preparação até que esteja apto a diferenciar cada particularidade com precisão. Nesse sentido, será desenvolvida uma base de dados que servirá como referência, permitindo à máquina verificar e comparar seus resultados com padrões previamente estabelecidos.

Além de reconhecer o ambiente, uma máquina autônoma também deve ser capaz de determinar a melhor trajetória para alcançar um determinado objetivo, unindo percepção e planejamento em sua tomada de decisão. Para viabilizar esse processo, estruturas consolidadas como a biblioteca Open Source Computer Vision (OpenCV) e a arquitetura YOLO têm se mostrado fundamentais para a análise em tempo real e a segmentação eficiente de trajetórias (OPENCV, 2025; REDMON et al., 2016).

Metodologia

O desenvolvimento do sistema iniciou-se com a coleta de imagens aéreas de áreas rurais brasileiras por meio do Google Maps (GOOGLE, 2025). Essas imagens foram padronizadas para a dimensão de 640x640 pixels e ampliadas utilizando técnicas de aumento de dados no Roboflow, como rotações, ajustes de iluminação e desfoques, resultando em um conjunto final de 1700 imagens distribuídas entre treino, validação e teste (ROBOFLOW, 2025). O processamento dessas imagens foi realizado utilizando a arquitetura YOLOv11, que possibilitou a segmentação de trajetórias e a detecção de caminhos viáveis (REDMON et al., 2016). O OpenCV foi utilizado no pré-processamento (OPENCV, 2025), enquanto diferentes otimizadores, como AdamW, NAdam, RAdam e o modelo automático do Ultralytics, foram avaliados a fim de identificar aquele com melhor desempenho para o problema proposto.

Após a segmentação, as rotas identificadas pelo drone foram transformadas em grades navegáveis e enviadas ao carro robótico por meio do protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) (ECLIPSE FOUNDATION, 2025). Dessa forma, o veículo terrestre recebe comandos simplificados, que foram executados em tempo real de acordo com as instruções enviadas pelo drone. O treinamento foi realizado no ambiente Google Colab (GOOGLE, 2025), utilizando uma GPU NVIDIA Tesla T4 com suporte à Compute Unified Device Architecture (CUDA) 12.4, garantindo a disponibilidade de recursos computacionais para treinar e testar os modelos (NVIDIA, 2025).

Resultados e Discussões

Os experimentos demonstraram que a integração entre carro robótico e drone possibilitou ganhos significativos em termos de tempo de exploração e eficiência de navegação em ambientes desconhecidos. O modelo treinado com o otimizador automático do Ultralytics YOLOv11 apresentou os melhores resultados, alcançando um mAP@0.5 de 0,7613 e um mAP@0.5:0.95 de 0,5438, com precisão de 0,81 e recall de 0,71. O tempo médio de inferência foi de 150 milissegundos por imagem, garantindo a viabilidade para aplicações em tempo real em plataformas embarcadas, como o Raspberry Pi.

Essa colaboração entre drone e veículo terrestre mostrou-se mais eficiente do que a navegação isolada do carro, uma vez que o drone proporcionou uma visão estratégica que permitiu a definição de trajetórias mais curtas e seguras. Além disso, a metodologia

apresentou potencial para aplicações em agricultura de precisão, missões de busca e resgate, mapeamento de áreas remotas e acesso a regiões de risco, onde a disponibilidade de mapas ou GPS é limitada.

Conclusão

O trabalho apresentado demonstrou a viabilidade de um sistema de navegação colaborativa entre drone e carro robótico, no qual a visão computacional atua como suporte para transformar imagens aéreas em rotas executáveis em solo. A colaboração entre veículos aéreos e terrestres representa um avanço relevante no campo da robótica autônoma, viabilizando soluções práticas para ambientes desafiadores.

Os resultados preliminares indicam que o uso de YOLOv11 aliado a ferramentas como OpenCV, Roboflow e MQTT possibilita inferência em tempo real com resultados satisfatórios, mesmo a partir de um conjunto reduzido de dados. Como próximos passos, pretende-se expandir a base de imagens utilizada, incorporar algoritmos mais avançados de planejamento de rotas e realizar experimentos em campo real, a fim de consolidar o sistema como solução prática para cenários críticos.

Referências

ECLIPSE FOUNDATION (Paho-MQTT). Paho Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Disponível em: <https://www.eclipse.org/paho/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

GOOGLE (Google Colab). Google Colaboratory. Disponível em: <https://colab.research.google.com/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

GOOGLE (Google Maps). Google Maps. Disponível em: <https://maps.google.com/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

NVIDIA CORPORATION (CUDA Toolkit). Compute Unified Device Architecture (CUDA). Disponível em: <https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>. Acesso em: 26 ago. 2025.

NVIDIA CORPORATION (Tesla T4). NVIDIA Tesla T4 GPU. Disponível em: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/tesla-t4/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

OPEN SOURCE COMPUTER VISION LIBRARY (OpenCV). Open Source Computer Vision Library. Disponível em: <https://opencv.org/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

REDMON, Joseph; DIVVALA, Santosh; GIRSHICK, Ross; FARHADI, Ali. You Only Look Once (YOLO): Real-time object detection. Disponível em: <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ROBOFLOW (Roboflow). Roboflow: annotation and dataset management platform. Disponível em: <https://roboflow.com/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

CÓDIGO: ET1165

AUTOR: VIRNA EMANUELLE VELOSO AGUIAR

ORIENTADOR: HELTON MAIA PEIXOTO

TÍTULO: Robotic Arm Control: Interface Humano-Robô Baseada em Comando Multimodais de Voz e Gestos

Resumo

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema multimodal integrado para controle intuitivo de um braço robótico, combinando uma Interface Gráfica do Usuário (GUI) desenvolvida em PyQt6 com tecnologias de visão computacional e reconhecimento de voz. O sistema oferece três modos de operação: controle por gestos manuais (rastreamento de movimento em tempo real via uma rede YOLOv8), gestos automáticos (execução de comandos predefinidos) e comando por voz (processado pela API do Google e classificado por um modelo Gemini AI). Uma arquitetura baseada em threads paralelas garante a responsividade da interface e o processamento simultâneo das diferentes modalidades. Os comandos, uma vez interpretados, são transmitidos via comunicação serial a uma placa Arduino, que controla os movimentos do braço robótico. Os resultados demonstram a eficácia do sistema, com alta precisão na detecção de gestos, classificação confiável de comandos de voz e uma interface estável e adaptativa. Apesar de testado em um braço de 2 graus de liberdade, a solução software é escalável, fornecendo uma base robusta para aplicações em automação industrial, oferecendo uma interação homem-máquina mais natural, segura e eficiente.

Palavras-chave: Braço Robótico, Interface Gráfica (GUI), Visão Computacional, Voz.

TITLE: Robotic Arm Control: A Human-Robot Interface Based on Multimodal Voice and Gesture Commands

Abstract

This paper presents the development of an integrated multimodal system for the intuitive control of a robotic arm, combining a Graphical User Interface (GUI) developed in PyQt6 with computer vision and speech recognition technologies. The system offers three operational modes: manual gesture control (real-time movement tracking via a YOLOv8 network), automatic gesture control (execution of predefined commands), and voice command control (processed by the Google API and classified by a Gemini AI model). An architecture based on parallel threads ensures interface responsiveness and the simultaneous processing of the different modalities. The interpreted commands are transmitted via serial communication to an Arduino board, which controls the robotic arm's movements. The results demonstrate the system's efficacy, with high precision in gesture detection, reliable classification of voice commands, and a stable, adaptive interface. Although tested on a 2-degree-of-freedom arm, the software solution is scalable, providing a robust foundation for industrial automation applications and offering a more natural, safe, and efficient human-machine interaction.

Keywords: Robotic Arm, Graphical User Interface (GUI), Computer Vision, Voice

Introdução

O uso de braços robóticos para automação em diversos âmbitos começou em 1961, quando o Unimate, o primeiro braço robótico programável, foi desenvolvido para a indústria (Kawasaki Robotics, 2022). Mais de 60 anos depois, a tecnologia robótica continua a expandir sua aplicação para a melhoria social, seja no setor industrial, entre outros (Ottoni, 2010).

Com os avanços da Inteligência Artificial, a interação entre humanos e robôs está em expansão. Sob essa perspectiva, essas interações podem replicar elementos da comunicação, com o auxílio de tecnologias de Processamento de Linguagem Natural (PLN) (Pereira, 2011). Assim, braços robóticos podem ser controlados para realizar movimentos a partir de comandos de voz. Além disso, o controle por gestos também possui uma importância significativa. Conseguir manipular produtos na indústria de maneira a reduzir o esforço, além de poder realizar procedimentos insalubres ou perigosos como a manipulação de elementos tóxicos e corrosivos abre caminho para uma produção mais segura e eficiente. Nesse contexto, o controle por gestos manuais também podem permitir que operadores humanos comandem robôs de forma natural, sem a necessidade de dispositivos complexos ou treinamento extensivo.

Tangente a isso, esses controles só são possíveis graças às Redes Neurais Convolucionais. As redes neurais convolucionais (CNNs) são amplamente utilizadas para tarefas de classificação de imagens, reconhecimento de objetos e processamento de áudio. Sua arquitetura é composta por quatro camadas principais: Convolução, Unidades Lineares Retificadas (ReLU), Max-Pooling e Camada Totalmente Conectada. A camada convolucional aplica filtros (matrizes de pesos) e gera um mapa de características. A ReLU introduz não-linearidade ao substituir valores negativos por zero, melhorando a eficiência do treinamento. O Max-Pooling reduz a dimensionalidade, retendo as informações mais relevantes, e a camada totalmente conectada realiza a classificação final com base nas características extraídas (Silva, 2018).

Para potencializar ainda mais essa interação intuitiva proporcionada pelos gestos e voz, uma interface gráfica para o usuário (GUI) é de extrema importância, garantindo que os comandos atinjam seu pleno potencial na realização das atividades. Uma Interface Gráfica do Usuário (GUI) é um tipo de interface humano-computador que permite a comunicação entre pessoas e máquinas por meio de elementos visuais. Ela surgiu como solução para o "problema da tela em branco" dos primeiros computadores, que deixava os usuários sem orientações sobre o que fazer em seguida. Seus três componentes principais - sistema de janelas, modelo de imagem e API - trabalham em conjunto para criar uma especificação coerente de aparência e comportamento para o sistema. Uma GUI transforma comandos abstratos em representações visuais intuitivas, permitindo que usuários interajam com o sistema de forma mais natural de maneira a remover barreiras de comunicação entre usuário e máquina (Jansen, 1998). Este trabalho tem como objetivo central desenvolver uma interface gráfica de usuário (GUI) utilizando pyQT para permitir uma interação intuitiva e em tempo real com o sistema de controle. Além disso, tem por objetivo também implementar algoritmos de reconhecimento de voz e processamento de linguagem natural para interpretar comandos verbais; e implementar e otimizar uma rede neural convolucional (CNN) para classificação de imagens, os quais serão utilizados como comandos intuitivos para o controle do braço robótico. Paralelamente, visa-se implementar um sistema de controle baseado em Arduino para traduzir os comandos em movimentos precisos e fluidos junto a um braço robótico impresso em 3D

no laboratório. Por fim, ambiciona-se desenvolver um sistema inteligente de tomada de decisão baseado em IA, permitindo que o robô adapte seus movimentos com base na interação por voz e por gestos, consolidando uma solução ergonômica, segura e eficiente para operações industrial.

Metodologia

Neste trabalho, utilizou-se um ambiente controlado, no qual foi possível realizar diversos testes para ambas as redes neurais. Além disso, a construção do conjunto de dados foi realizada por indivíduos com diferentes sotaques, gêneros e faixas etárias, além de possuir objetos ao fundo, proporcionando uma maior generalização do modelo e simulando condições reais.

Primeiramente, quanto ao desenvolvimento do aplicativo desktop e para o algoritmo que utiliza os resultados das redes neurais para o controle usamos Python na IDE Visual Studio Code. A linguagem C++ foi utilizada na IDE do Arduino para a criação do algoritmo que recebe as informações das redes e as usa para a movimentação do robô.

Em segundo lugar, toda rede neural depende fundamentalmente de um conjunto de dados robusto e bem estruturado para seu aprendizado. É através desses dados que a rede identifica padrões, compreende relações complexas e desenvolve a capacidade de realizar previsões ou classificações precisas. A plataforma “Roboflow” foi utilizada para a criação e gerenciamento dos conjuntos de dados gestuais — entende-se como gestos manuais os movimentos espelhados entre homem-máquina e gestos automáticos como um gesto estático que está associado a algum movimento predeterminado para a máquina. Para a rede de detecção de gestos manuais foram utilizadas 2316 imagens, sendo que 463 (20%) foram reservadas para teste, 370 (16%) para validação, e 1483 (64%) para o treinamento. Para os gestos automáticos foram utilizadas 2179 imagens, sendo que 435 (20%) foram reservadas para teste, 348 (16%) para validação, e 1396 (64%) para o treinamento.

Para a interface gráfica do sistema de controle do braço robótico, foi desenvolvida uma aplicação utilizando PyQt6 que gerencia três métodos distintos de controle: gestos manuais, gestos automáticos e comando por voz. A classe principal “RoboticArmMenu” cria a janela de controle que permite ao usuário selecionar o método de operação, visualizar o feed da câmera em tempo real, monitorar informações de processamento e acessar configurações do sistema. A interface é dinâmica e se adapta automaticamente ao método de controle selecionado, mostrando apenas as informações relevantes para cada modalidade através de um sistema de widgets configuráveis.

O sistema opera através de três threads independentes que rodam em paralelo: “Thread_1” para gestos manuais, que detecta mãos abertas/fechadas e rastreia movimentos; “Thread_2” para comando por voz, que utiliza reconhecimento de fala e classificação com Gemini AI; e “Thread_3” para gestos automáticos, que executa comandos predefinidos como "iniciar", "buscar", "agarrar" e "parar". Cada “thread” é responsável por seu próprio processamento e comunicação serial com o braço robótico, enquanto emite sinais para atualizar a interface principal com informações em tempo real como FPS, estado do gripper, posição e direção do movimento.

Ademais, a aplicação inclui ainda uma janela de configurações, “RoboticArmSetup”, que permite ajustar parâmetros como porta serial, dispositivo de captura, método de controle e

chave de API. Todas as configurações são salvas em arquivo e o sistema inclui mecanismos de segurança para tratamento de exceções, garantindo que as threads sejam interrompidas corretamente em caso de erro e que os recursos sejam liberados apropriadamente. A interface foi projetada para ser intuitiva, com botões para iniciar/parar execução, acessar configurações e visualizar informações do projeto.

Sobre esse prisma, o processo de coleta e uso de dados é similar. Para classificar comandos de voz, o sistema usa a biblioteca PyAudio para acessar o microfone. Ao detectar um sinal de voz baseado em um limiar de energia, inicia uma gravação de 2 segundos. Um arquivo temporário é gerado, pré-processado e então transcrito para texto pela API do Google. Por fim, um modelo Gemini AI classifica o áudio em uma de 7 classes: "open", "closed", "left", "right", "up", "down" ou "none".

Além disso, para a detecção de gestos manuais, a OpenCV acessa uma webcam para uma transmissão em tempo real. Cada frame é processado pelo YOLOv8, que reconhece gestos de mão aberta e fechada. A rede detecta todas as mãos no frame e seleciona uma para controlar o robô com base numa pontuação que considera a área (proximidade) e a confiança da detecção. A localização da mão e sua classe são armazenadas, e a direção do movimento é calculada pela variação de posição entre frames, verificando-se também se a mão está numa região de interesse.

No controle por gestos automáticos, o sistema é similar, mas detecta quatro gestos: "start", "search", "grab" e "stop". Quando uma mão é detectada na região de interesse, o gesto é classificado e convertido em um comando específico para o braço robótico. Utilizando cinemática inversa, o braço executa movimentos automatizados, como posicionar-se numa coordenada, abrir/fechar a garra ou retornar à posição inicial, sem necessidade de controle direto do usuário além de exibir o gesto.

Após o processamento dos dados, independentemente do método de controle selecionado pelo usuário, o sistema estabelece uma comunicação serial com a placa Arduino por meio da porta USB utilizando a biblioteca PySerial. Os comandos gerados são codificados em pacotes de bytes e transmitidos para a placa, onde são decodificados e convertidos em sinais PWM específicos para cada servo motor. Essa interface permite coordenar com precisão os movimentos do braço robótico, transformando os comandos abstratos em ações físicas executadas pelos atuadores.

Resultados e Discussões

O desenvolvimento da interface gráfica (Figura 1) utilizando PyQt6 resultou na criação de um sistema robusto e versátil para controle do braço robótico através de três métodos distintos, como mostrado na Figura 4. A aplicação demonstrou funcionamento estável e eficiente na integração entre os componentes de software e hardware, permitindo o controle do braço robótico através de modalidades intuitivas baseadas em gestos e comandos de voz.

O sistema de processamento em paralelo através de três threads independentes mostrou-se eficaz na manutenção da responsividade da interface, mesmo durante operações computacionalmente intensivas como o processamento de imagens da webcam ou o reconhecimento de voz. A taxa de atualização da interface manteve-se estável, com valores de FPS adequados para “feedback” em tempo real durante a operação por gestos manuais.

Na modalidade de controle por gestos manuais, o algoritmo de detecção baseado em YOLOv8 demonstrou alta precisão na identificação de mãos abertas e fechadas, com taxa de acerto consistente acima de 90% em condições de iluminação adequada. O sistema de rastreamento de movimentos mostrou-se responsivo, permitindo o controle intuitivo da direção do braço robótico através do movimento manual. A seleção automática da mão mais proeminente na cena, baseada em critérios de proximidade e confiança de detecção, mostrou-se eficaz na maioria dos cenários testados.

Para o controle por voz, a integração com a API do Google e o modelo Gemini AI permitiu a classificação eficiente dos comandos em sete categorias distintas. O sistema de gravação baseado em limiar de energia mostrou-se adequado para iniciar a captura de áudio apenas quando necessário, reduzindo o processamento desnecessário. A latência total do processo, desde a captura do áudio até a execução do comando, ficou em aproximadamente 2-3 segundos, tempo considerado adequado para esta modalidade de interação.

No modo de gestos automáticos, a detecção e classificação dos quatro gestos predefinidos ("iniciar", "buscar", "agarrar" e "parar") funcionou conforme esperado, permitindo a execução de sequências automatizadas sem necessidade de controle contínuo pelo usuário, com exceção do comando "pegar". A implementação de cinemática inversa para conversão dos gestos em movimentos coordenados do braço robótico mostrou-se precisa e confiável durante os testes.

A comunicação serial com a placa Arduino através da biblioteca PySerial demonstrou estabilidade e confiabilidade, com transmissão eficiente de comandos codificados em pacotes de bytes. A taxa de sucesso na transmissão e execução dos comandos aproximou-se de 99% durante os testes extensivos, com latência insignificante entre o comando gerado pela interface e a execução física pelo braço robótico.

O sistema de configurações implementado permitiu o ajuste flexível dos parâmetros de operação, incluindo seleção de porta serial, dispositivo de captura e método de controle, apresentado na Figura 3. O mecanismo de persistência das configurações em arquivo mostrou-se eficaz na manutenção das preferências do usuário entre sessões.

Os mecanismos de tratamento de exceções implementados garantiram a robustez do sistema, prevenindo falhas catastróficas em caso de erros de comunicação ou processamento. As threads foram gerenciadas adequadamente, com encerramento correto e liberação de recursos mesmo em condições de erro.

Em termos de usabilidade, a interface mostrou-se intuitiva, com disposição lógica dos elementos de controle e "feedback" visual adequado do estado do sistema. A apresentação de informações em tempo real, como FPS, estado do gripper, posição e direção do movimento, permitiu ao usuário manter consciência situacional durante a operação do braço robótico, reduziu a complexidade percebida e potencialmente diminuiu a curva de aprendizado para operação do sistema, como mostrado na Figura 2.

A implementação inicial da interface utilizou um braço robótico de 2 graus de liberdade, um modelo antigo que não possuía uma garra funcional, limitando suas aplicações. Para expandir as capacidades do sistema, a próxima etapa do projeto envolve a integração com um braço mais moderno, com maior liberdade de movimento e uma garra totalmente operacional.

Em conclusão, o sistema desenvolvido atingiu os objetivos propostos, oferecendo uma plataforma versátil e robusta para controle multimodal de braços robóticos. A integração bem-sucedida de tecnologias de visão computacional, reconhecimento de voz e comunicação serial resultou em uma ferramenta eficaz para aplicações educacionais e de pesquisa em robótica. A arquitetura modular adotada permite expansões futuras, como a adição de novos métodos de controle ou a integração com outros dispositivos robóticos.

Conclusão

Em conclusão, este trabalho demonstrou com sucesso o desenvolvimento e a integração de um sistema multifuncional e intuitivo para o controle de um braço robótico, combinando uma interface gráfica robusta (GUI) com visão computacional e reconhecimento de voz. A implementação de três modalidades de controle por gestos manuais, gestos automáticos e comando por voz, em uma única aplicação, gerenciada por “threads”, resultou em uma plataforma versátil e responsiva.

Ademais, os resultados obtidos confirmaram a eficácia da arquitetura proposta. A rede neural baseada em YOLOv8 mostrou alta precisão na detecção e classificação de gestos, enquanto o “pipeline” de processamento de voz, utilizando a API do Google e o modelo “Gemini AI”, provou ser válido para interpretar comandos verbais. A comunicação serial com o Arduino garantiu uma tradução precisa e confiável dos comandos abstratos em movimentos físicos.

Por adição, a interface gráfica, desenvolvida em PyQt6, cumpriu seu papel central ao oferecer uma experiência de usuário unificada, adaptativa e intuitiva, permitindo que usuários interajam com o sistema de forma mais natural de maneira a remover barreiras de comunicação entre usuário e máquina, essencial para a operação em tempo real.

Porém, embora as capacidades do protótipo tenham sido limitadas pelo hardware utilizado, um braço de 2 graus de liberdade sem garra funcional, a solução de software desenvolvida é completamente escalável. O trabalho estabelece uma base sólida para futuras expansões, que incluem a integração com um braço robótico mais complexo e com maior grau de liberdade, o refinamento dos algoritmos de IA para maior precisão e a exploração de aplicações em ambientes industriais reais.

Por fim, este projeto contribui para o campo da interação humano-robô, oferecendo uma alternativa ergonômica, acessível e eficiente para o controle de robôs, com potencial para aplicações em automação, educação e em operações que requeiram segurança e precisão, pavimentando o caminho para sistemas de automação mais intuitivos e colaborativos.

Referências

HEIMONEN, Tomi et al. Designing gesture-based control for factory automation. In: IFIP Conference on Human-Computer Interaction. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 202-209.

INTERAÇÃO HUMANO-ROBÓTICA É RECURSO PARA O FUTURO DE INDÚSTRIAS. Grupo JAV. Disponível em: <https://www.jav.com.br/humano-robotica/>. Acesso em 20 jun. 2025.

JANSEN, Bernard J. The graphical user interface. ACM SIGCHI Bulletin, v. 30, n. 2, p. 22-26, 1998.

OTTONI, André. Introdução à robótica. Minas Gerais, 2010. Disponível em: https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/orcv/materialdeestudo_introducaoarobotica.pdf. Acesso em 14 ago. 2024.

PEREIRA, Silvio. Processamento de Linguagem Natural. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

ROBÓTICA: O QUE É, HISTÓRICO, TIPOS E APLICAÇÕES. Engenharia Híbrida. Disponível em: <https://www.engenhariahibrida.com.br/post/robotica-o-que-e-historico-tipos-aplicacoes>. Acesso em 27 jul. 2024.

SILVA, Rodrigo Emerson Valentim da. Um estudo comparativo entre redes neurais convolucionais para a classificação de imagens. 2018.

Anexos

Figura 1

Figura 2

Figura 3

Figura 4

CÓDIGO: ET1196

AUTOR: ICARO BRUNO SILBE CORTÊS

COAUTOR: RONALDO CARLOTTO BATISTA

ORIENTADOR: LEO GOUVEA MEDEIROS

TÍTULO: Vínculos na variação da constante da gravitação baseados em medidas de índice de crescimento.

Resumo

O estudo do crescimento de estruturas ajuda a entender a física da expansão acelerada do Universo. Neste contexto, um parâmetro relevante é o índice de crescimento, γ , que parametriza a taxa de crescimento linear de estruturas. O modelo padrão da cosmologia prevê um valor de $\gamma = 0,55$, no entanto a Ref. [6] foi capaz de medir um valor significativamente maior de $\gamma = 0,633 \pm 0,025$, excluindo o modelo padrão com $3,7\sigma$. No presente trabalho abordamos as consequências deste valor elevado em 2 modelos de gravidade modificada na forma geral $G(a) = G_{\text{eff}}(a) \cdot G_0$: uma expansão de Taylor de segunda ordem de $G_{\text{eff}}(a)$, que chamamos de g_2 ; e um modelo que acopla o parâmetro de densidade de energia escura à $G_{\text{eff}}(a)$, que chamamos de μ_0 . Usando dados de cronômetros cósmicos (CC) para obter vínculos mínimos na cosmologia de fundo, observamos que a parametrização do índice de crescimento para o modelo g_2 apresenta resíduos consideráveis, de modo que para este modelo, somamos um erro de $3\% \cdot \gamma$ aos valores observados de γ , considerando assim o resíduo como erro sistemático. Também usamos dados do DESI DR2 BAO para vincular a cosmologia de fundo e obtivemos 2 principais resultados: os limites para os modelos de gravidade modificada são pouco afetados pelos vínculos da cosmologia de fundo; e, ambos os modelos excluem uma gravitação constante ($g_2=0$ ou $\mu_0=0$) com $g_2 > 0$ com $2,42\sigma$ para modelos g_2 e $\mu_0 < 0$ com $3,43\sigma$ para modelos μ_0 .

Palavras-chave: Cosmologia; Gravidade Modificada; Formação de Estruturas;

TITLE: Constraints on the variation of the gravitational constant based on growth index measurements.

Abstract

The study of structure growth helps to understand the physics of the accelerated expansion of the Universe. In this context, a relevant parameter is the growth index, γ , that parametrizes the linear growth rate of structures. The standard cosmology model predicts a value of $\gamma = 0,55$, however, Ref. [6] was capable of measuring a significantly higher value of $\gamma = 0,633 \pm 0,025$, excluding the standard model with $3,7\sigma$. In this work, we discuss the consequences of this high value in two modified gravity models in the general form $G(a) = G_{\text{eff}}(a) \cdot G_0$: a second order Taylor expansion of $G_{\text{eff}}(a)$, that we call as g_2 ; and a model that couples the

dark energy density parameter to $G_{\text{eff}}(a)$, that we call as μ_0 . Using cosmic chronometers (CC) to obtain minimal constraints of the background cosmology, we observed that the growth index parametrization for the g_2 model yields considerable residuals, so that for this model, we added a error of $3\% \cdot \gamma$ for the observed value of γ as so considering the residuals as a systematic error. We also used DESI DR2 BAO data to constraint the background cosmology and obtained 2 main results: the limits for the modified gravity are little affected by the constraints of the background cosmology; and, both modelos excludes the constant gravity ($g_2=0$ or $\mu_0=0$) with $g_2 > 0$ with $2,42\sigma$ for the g_2 models and $\mu_0 < 0$ with $3,43\sigma$ for the μ_0 models.

Keywords: Cosmology; Modified Gravity; Growth of Structure;

Introdução

O estudo do crescimento de estruturas cosmológicas por meio da teoria de perturbação linear é uma forma de testar vários fenômenos físicos que não seriam diretamente influenciados pela cosmologia de fundo, no contexto de modelos de Hordenski. No estudo de crescimento de estruturas, os principais dados disponíveis são medidas de S_8 e da quantidade relacionada $f \cdot \sigma_8$, com a relação $S_8 \equiv \sigma_8(\Omega_{m0}/0,3)^{0,5}$, onde σ_8 é a amplitude de flutuações de matéria na escala de 8 Mpc/h, Ω_{m0} é o parâmetro de densidade de matéria e $f \equiv d \ln(\delta m)/d \ln(a)$ é a taxa de crescimento linear de perturbações de matéria, onde δm é o contraste de densidade de matéria e " a " é o fator e escala. Com relação à primeira quantidade, é reconhecida a existência de uma tensão entre os valores de S_8 previstos pela Radiação Cósmica de Fundo (CMB) [1] e os estimados usando aglomeração de galáxias e lentramento gravitacional fraco [2].

Existe uma parametrização de f introduzida pela Ref. [3], a Eq. (1) no apêndice em anexo, onde $\Omega_m = \Omega_m(a)$ e γ é o chamado índice de crescimento, que geralmente é considerado uma constante. É bem sabido que para o modelo de concordância da cosmologia, o Λ CDM, $\gamma \simeq 0,55$ [3,4]. Usando dados de cronômetros cósmicos (CC) com vínculos mínimos para Λ CDM, Ref. [5] encontrou o valor de $\gamma = 0,551 \pm 0,001$, mas dados observacionais mostram que $\gamma = 0,633 \pm 0,025$ [6], o que representa uma tensão de $3,28\sigma$ e implica numa supressão de crescimento em relação ao modelo padrão. Ref. [5] mostra que modelos de energia escura (DE) não são o suficiente para explicar esta tensão, mesmo considerando diferentes modelos de energia escura e cosmologia de fundo. Além disso, Ref. [5] também mostra que uma parametrização de γ constante produz baixos resíduos para a parametrização da Eq. (1).

No presente trabalho nós abordamos a pergunta: quais são as implicações de assumir um γ alto em modelos de gravidade modificada? Para responder essa pergunta, usamos dados de $H(z)$ de CC e os mais recentes dados de oscilações acústicas bariônicas da segunda divulgação de dados (DR2) do Dark Energy Spectroscopy Instrument (DESI) [7] para vincular a cosmologia de fundo e então tratamos o γ observacional como uma função de verossimilhança. Com estes dados, fomos capazes de estabelecer limites em duas parametrizações distintas de modelos de gravidade com um G variável no tempo.

Os modelos de gravidade modificada considerados consistiram de duas parametrizações de $G_{\text{eff}}(a)$, onde $G(a) = G_{\text{eff}}(a) \cdot G_0$ com G_0 sendo a constante de Newton. A primeira parametrização, à qual vamos nos referir como g_2 , se baseia numa expansão de Taylor de segunda ordem da função $G_{\text{eff}}(a)$, como descrito pela Eq. (2) no apêndice em anexo [8]. Nessa equação, g_0 , g_1 e g_2 são os parâmetros do modelo. A segunda parametrização, à qual

vamos nos referir como μ_0 , acopla a gravidade modificada à expansão acelerada do Universo [9]. Esta parametrização é descrita pela Eq. (3) no apêndice em anexo e nela, μ_0 é um parâmetro livre e Ω_{de0} é o parâmetro de densidade de DE no presente. Em ambos os modelos, existe uma relação aproximadamente linear entre os parâmetros do modelo e o índice de crescimento. Nestes modelos, adotar $\gamma = 0,633 \pm 0,025$ gera vínculos que excluem significativamente o modelo padrão.

Metodologia

Cosmologia

de

fundo

No presente trabalho, assumimos uma cosmologia de fundo conforme o modelo padrão de Λ CDM plano sob a métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker. Com isso, escrevemos a equação de Friedmann na forma da Eq. (4) no apêndice em anexo, onde Ω_{m0} é o parâmetro de densidade de matéria no presente e $\Omega_{de0} = \Omega_{\Lambda} = 1 - \Omega_{m0}$ é o parâmetro de densidade de energia escura no presente e H_0 é a constante de Hubble. Com essas considerações, conseguimos caracterizar a cosmologia de fundo por apenas dois parâmetros: (h, Ω_{m0}) , onde $h \equiv H_0 / (100 \text{ km/s/Mpc})$.

Dados

Para vincular a cosmologia de fundo usando o método de Cadeia de Markov de Mont Calro (MCMC), nós usamos dados dos conjunto de dados de CC ou do DESI com uma função de verossimilhança baseada no valor medido do índice de crescimento. A verossimilhança CC usa um conjunto de 32 dados de $H(z)$ de cronômetros cósmicos compilados pela Ref. [10] e com a mesma composição descrita na Ref. [5], com 17 pontos não correlacionados e 15 pontos cujos erros sistemáticos foram considerados com uma matriz de covariância para o modelo BC3 como descrito em <https://gitlab.com/mmoresco/CCcovariance>. A verossimilhança DESI é a implementação do COBAYA [11] da verossimilhança do DESI DR2 [7] junto com um conjunto de priors correlacionados do CMB em $(\theta^*, \omega_b, \omega_{bc})$ CMB, como descrito no apêndice A da Ref. [7], onde θ^* é a escala angular dos picos acústicos do CMB, $\omega_b \equiv \Omega_b h^2$ é o parâmetro de densidade física bariônica, e $\omega_{bc} \equiv (\Omega_b + \Omega_c) h^2$, com Ω_b sendo o parâmetro de densidade bariônica e Ω_c o parâmetro de densidade de matéria escura. Desses 3 parâmetros amostrados, usamos o CAMB [12, 13] para calcular os parâmetros da cosmologia de fundo (h, Ω_{m0}) .

A verossimilhança γ consiste em uma distribuição gaussiana ao redor do valor medido, na forma descrita pela Eq. (5) no apêndice em anexo, onde $\gamma(\theta)$ é o índice de crescimento de um modelo particular representado pelo conjunto de parâmetros $\theta = (h, \Omega_{m0}, g_2)$ ou (h, Ω_{m0}, μ_0) dependendo do modelo e D_γ , e seu desvio padrão σ_γ , são $\gamma = 0,633 \pm 0,025$ para os modelos μ_0 , como medido [6] ou $\gamma = 0,633 \pm 0,031$ para os g_2 , considerando os resíduos na parametrização (1) com o modelo g_2 como erros sistemáticos (onde os resíduos tem um máximo de $\sim 3\%$, como será discutido na subseção seguinte). Estes erros de $3\% \cdot \gamma$ são somados em quadratura resultando no desvio padrão de $\sigma_\gamma = 0,031$ para os modelos g_2 . Junto a esta verossimilhança, também aplicamos diferentes conjuntos de priors, como listado na Tab. I no apêndice em anexo.

A amostragem com MCMC foi feita utilizando o pacote COBAYA [11, 14] com a estatística

Gelman-Rubin satisfazendo $R-1 < 0,01$ como critério de convergência, gerando 2100 a 3100 passos para amostragens com CC e 4600 a 5700 passos para amostragens com DESI, tendo uma fração de aceitação de 40%. As distribuições de referência para amostras iniciais de cada parâmetro também estão listadas na Tab. I. Como um passo de pós-processamento, também descartamos os primeiros 30% passos como um "burn-in".

Resultados e Discussões

Efeitos de gravidade modificada em estruturas cosmológicas

A evolução linear de um contraste de densidade de matéria $\delta \equiv \rho/\rho_m - 1$ (onde ρ_m é a densidade média) considerando uma constante da gravitação não padrão $G(a) = G_{\text{eff}}(a) \cdot G_0$ (onde G_0 é a constante da gravitação de Newton) pode ser descrita pela Eq. (6) no apêndice em anexo, onde as aspas denotam derivadas em relação ao fator de escala. Diferentes parametrizações de G_{eff} serão discutidos na próxima subsubseção. Resolvendo a Eq. (6) numericamente, podemos computar a taxa de crescimento $f \equiv d \ln(\delta m)/d \ln(a)$ e ajustar um valor constante de γ na parametrização da Eq. (1). Discussões sobre a acurácia dessa parametrização no modelo padrão da cosmologia, considerando diferentes equações de estado da energia escura são feitos nas Refs. [3, 5], incluindo o caso Λ CDM usado neste trabalho. Para o caso dos modelos de gravidade modificada que estudamos, a raiz média quadrada (rms) dos resíduos percentuais (r , para valores com piores casos) é considerável para modelos g_2 ($r \sim 1.89 \pm 0.75$ [%]), enquanto que para modelos μ_0 , a maioria dos resíduos são menos que meio por cento ($r \sim 0.200-0.011+0.086$ [%]).

Como os resíduos são consideráveis para modelos g_2 , decidimos adicionar resíduos de 3% como erro sistemático da parametrização de γ , resultando no desvio padrão discutido anteriormente.

Quanto ao valor preciso de γ , o modelo cosmológico padrão prevê que $\gamma = 0,551 \pm 0,001$ [3-5], mas um valor significativamente maior de $\gamma = 0,633 \pm 0,025$ [6] (e um valor menos significativo de $\gamma = 0,731 \pm 0,086$ [15] e um intervalo de valores da Ref. [16]) foi determinado com dados observacionais, implicando em supressão de crescimento. Em termos de gravidade modificada, supressão de crescimento pode ser explicada por um valor menor de G no passado, o que implica em um G crescente no presente. Em seguida discutimos quais valores dos parâmetros correspondem em um G crescente nos modelos de gravidade modificada considerados.

Modelos de gravidade modificada

Como supracitado, este trabalho considera dois modelos de gravidade modificada que parametrizam $G_{\text{eff}}(a)$. O primeiro consiste numa expansão de Taylor de segunda ordem da função $G_{\text{eff}}(a)$, descrito pela Eq. (2) no apêndice em anexo, onde g_0 , g_1 e g_2 são os parâmetros do modelo. Por meio de medições locais da gravidade no sistema solar e de supernovas Ia, podemos restringir $g_1 \ll 10^{-3}$ [17], de modo que podemos desprezar os efeitos de g_1 , além disso, considerando vínculos da constante de Newton a partir da nucleossíntese do big bang, sabemos que $G_{\text{eff}}(t_{\text{BBN}}) \sim 1$ [18], de modo que podemos fixar $g_0 = 1 - g_2/2$. Com essas considerações, definimos o modelo g_2 como na Eq. (7) no apêndice em anexo, onde g_2 é o único parâmetro livre. Neste modelo $g_2 > 0$ é associado a um G crescente, i.e., um menor G no passado, então esperamos um resultado atendendo a estas condições, de acordo com as medidas de índice de crescimento.

O segundo modelo é uma parametrização fenomenológica construída para acoplar a variação da gravidade com a expansão acelerada do universo, como descrito na Eq. (3) no apêndice em anexo, onde μ_0 é o único parâmetro livre. Este modelo é de particular interesse por ser amplamente utilizado em colaborações como o DESI [9]. Neste modelo, $\mu_0 > 0$ implica em um G crescente o que também seria em acordo com as medidas de índice de crescimento.

Resultados de amostragem

Baseado no método de amostragem descrito anteriormente, obtivemos as distribuições posteriores para os modelos g_2 , como mostrado na Figura 1 no apêndice em anexo, e para os modelos μ_0 na Figura 2, ambas feitas com o pacote GetDist [19]. Como esperado, os dados do DESI vincularam os parâmetros de fundo significativamente mais que os de CC, mas com pouco efeito nas distribuições posteriores do γ e g_2 ou μ_0 , demonstrando que o fundo não é a principal influência no vínculo destes parâmetros. Mais importante que isso, pode-se notar que mesmo com as distribuições de fundo mais amplas, os dados excluem modelos com constante da gravitação constante (i.e., $g_2=0$ ou $\mu_0=0$) pelos limites $g_2 < 0$ ou $\mu_0 > 0$, com alguns casos de μ_0 apresentando uma tensão de mais de 3σ em relação ao modelo constante. Também há uma clara correlação entre g_2 ou μ_0 e γ .

Os valores médios e limites marginalizados em 1D para 68% CL, assim como a respectiva significância da tensão dos modelos em relação ao modelo de gravitação constante padrão, em termos de $T\sigma \equiv \bar{g}_2/\sigma_{g_2}$ e $T\sigma \equiv \bar{\mu}_0/\sigma_{\mu_0}$, estão exibidos na Tabela II no apêndice em anexo. Note que os vínculos nos parâmetros dos modelos dependem da acurácia das medições do índice de crescimento. Como uma consequência disso, o modelo g_2 , que tem resíduos significativos tratados como erros sistemáticos, exclui o modelo padrão com uma significância inferior de $2,58\sigma$. Por outro lado, o modelo μ_0 , com seu baixo resíduo, nos permite ajustar γ com maior precisão e consequentemente também vincular o μ_0 com maior precisão, assim, os dados do DESI aumentam a tensão com o modelo de constante da gravitação constante para $3,43\sigma$.

Conclusão

Ao longo deste trabalho, exploramos as consequências da estimativa do índice de crescimento da Ref. [6] para modelos de gravidade modificada definidos pelas Eqs. (2) e (3) no apêndice em anexo, respectivamente chamados de modelos g_2 e μ_0 . Observamos que algumas realizações de modelos g_2 apresentam altos resíduos na parametrização do índice de crescimento (Eq. (1)) e por isso, para os modelos g_2 , consideramos um erro sistemático de $3\% \cdot \gamma$ somado em quadratura ao erro da medida do valor medido de γ .

Para vincular a cosmologia de fundo, nós empregamos 2 funções de verossimilhança distintas, uma baseada num conjunto de dados de cronômetros cósmicos e outra baseada no DESI DR2 com um prior de CMB. A ambos os casos aplicamos verossimilhanças gaussianas em torno do valor reportado de índice de crescimento. As distribuições posteriores para os modelos g_2 e μ_0 são mostradas respectivamente nas Figuras 1 e 2 no apêndice em anexo e pintam uma figura clara: vínculos melhores na cosmologia de fundo possuem pouco impacto nos vínculos de γ , g_2 e μ_0 ; existe uma relação linear entre o índice de crescimento e os parâmetros de gravidade modificada; e, com mais relevância, ambos os modelos apresentam uma tensão $> 2,42\sigma$ em relação ao modelo padrão com uma constante da gravitação constante, como mostrado pelos vínculos marginalizados em 1D na Tabela II no apêndice em anexo. O modelo μ_0 com dados do DESI em particular apresentam uma tensão de $3,43\sigma$.

Referências

- [1] N. Aghanim et al., *Astron. Astrophys.*, 641, A6 (2020). Planck 2018 results. vi. cosmological parameters.
- [2] E. Di Valentino et al., *Astropart. Phys.*, 131, 102604 (2021). Cosmology intertwined iii: $f\sigma_8$ and s_8 .
- [3] E. V. Linder, *Phys. Rev.*, D72, 043529 (2005). Cosmic growth history and expansion history.
- [4] L.-M. Wang and P. J. Steinhardt, *Astrophys. J.*, 508, 483–490 (1998). Cluster abundance constraints on quintessence models.
- [5] Í. B. S. Cortês and R. C. Batista, *Physical Review D*, August (2025). Can dark energy explain a high growth index?
- [6] N.-M. Nguyen, D. Huterer, and Y. Wen, *Phys. Rev. Lett.*, 131(11), 111001 (2023). Evidence for Suppression of Structure Growth in the Concordance Cosmological Model.
- [7] March (2025). Desi dr2 results ii: Measurements of baryon acoustic oscillations and cosmological constraints.
- [8] S. Nesseris, C. Blake, T. Davis, and D. Parkinson, *JCAP*, 1107, 037 (2011). The wiggles dark energy survey: constraining the evolution of newton's constant using the growth rate of structure.
- [9] November (2024). Desi 2024 vii: Cosmological constraints from the full-shape modeling of clustering measurements.
- [10] A. Favale, A. Gómez-Valent, and M. Migliaccio, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, June (2023). Cosmic chronometers to calibrate the ladders and measure the curvature of the universe. a model-independent study.
- [11] J. Torrado and A. Lewis (2020). Cobaya: Code for bayesian analysis of hierarchical physical models.
- [12] A. Lewis, A. Challinor, and A. Lasenby, *Astrophys. J.*, 538, 473–476 (2000). Efficient computation of cmb anisotropies in closed frw models.
- [13] C. Howlett, A. Lewis, A. Hall, and A. Challinor, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, April (2012). Cmb power spectrum parameter degeneracies in the era of precision cosmology.
- [14] A. Lewis and S. Bridle, *Physical Review D*, November (2002). Cosmological parameters from cmb and other data: A monte carlo approach.
- [15] January (2025). Illustrating the consequences of a misuse of S_8 in cosmology.
- [16] E. Specogna, W. Giarè, and E. Di Valentino, *Phys. Rev. D* 111, 103510, Published 8 May, 2025, May (2024). Planck-pr4 anisotropy spectra show (better) consistency with general relativity.
- [17] S. Nesseris and L. Perivolaropoulos, *Physical Review D*, January (2007). Limits of extended quintessence.
- [18] C. Bambi, M. Giannotti, and F. L. Villante, March (2005). The response of primordial abundances to a general modification of g and/or of the early universe expansion rate
- [19] A. Lewis (2019). GetDist: a Python package for analysing Monte Carlo samples.

Anexos

Apêndice pg1

Apêndice pg2

Apêndice pg3

CÓDIGO: ET1211

AUTOR: ARTUR ALEXANDRE DA SILVA

COAUTOR: HELENICE VITAL

ORIENTADOR: MARY LUCIA DA SILVA NOGUEIRA

TÍTULO: LEVANTAMENTO DE DADOS GEOESPACIAIS DA MARGEM CONTINENTAL ADJACENTE AO RN (AMAZÔNIA AZUL RN).

Resumo

A plataforma continental do Rio Grande do Norte, com aproximadamente 410 km de extensão, desempenha papel estratégico na biodiversidade marinha, no equilíbrio climático e na disponibilidade de recursos energéticos, minerais e pesqueiros. Compreendendo a importância desse ambiente, foi criada, em 2020, na UFRN, a Rede de Pesquisa Amazônia Azul RN, com o objetivo de consolidar dados produzidos por décadas de pesquisas sobre a região. Este plano de trabalho buscou estruturar um banco de dados geoespacial interoperável, compatível com os padrões da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), instituída pelo Governo Federal por meio do Decreto nº 6.666/2008. A metodologia envolveu o estudo das normas e requisitos da INDE, o planejamento da arquitetura do banco de dados e a adequação de formatos e metadados, com destaque para GeoPackage (.gpkg) e Shapefile (.shp) em dados vetoriais, além de GeoTIFF (.tif) e NetCDF (.nc) em dados raster. Os resultados apontam que, embora a UFRN possua um acervo expressivo de informações sobre o ambiente marinho, ainda há necessidade de integração e padronização para sua plena inserção na INDE. Conclui-se que a adesão da UFRN a essa infraestrutura ampliará a visibilidade científica da instituição, fortalecerá o planejamento costeiro e marinho no estado e posicionará a universidade como uma das pioneiras do Nordeste a disponibilizar dados marinhos em uma plataforma nacional de acesso público.

Palavras-chave: Plataforma Continental, INDE, Geodados, Amazônia Azul RN.

TITLE: Geospatial Data Survey of the Continental Margin Adjacent to Rio Grande do Norte (Blue Amazon RN).

Abstract

The continental shelf of Rio Grande do Norte, extending approximately 410 km, plays a strategic role in marine biodiversity, climate regulation, and the availability of energy, mineral, and fishery resources. Recognizing the importance of this environment, the Blue Amazon RN Research Network was established at UFRN in 2020, aiming to consolidate decades of research data on the region. This work plan sought to structure an interoperable geospatial database compatible with the

standards of the Brazilian Spatial Data Infrastructure (INDE), created by the Federal Government through Decree No. 6.666/2008. The methodology involved studying INDE's norms and requirements, planning the database architecture, and adapting formats and metadata, with emphasis on GeoPackage (.gpkg) and Shapefile (.shp) for vector data, as well as GeoTIFF (.tif) and NetCDF (.nc) for raster data. The results indicate that although UFRN holds a significant collection of information on the marine environment, integration and standardization processes are still required for its full inclusion in INDE. It is concluded that UFRN's adherence to this infrastructure will enhance the institution's scientific visibility, strengthen coastal and marine planning in the state, and position the university as one of the pioneering institutions in the Northeast to provide marine data in a national open-access platform.

Keywords: Continental Shelf, INDE, Geospatial Data, Blue Amazon RN.

Introdução

A plataforma continental do Estado do Rio Grande do Norte possui aproximadamente 410 km de extensão, dividida em duas direções: a Plataforma Leste, denominada Oriental, e a Plataforma Norte, denominada Setentrional. Sua profundidade varia até 70 metros, alcançando em alguns trechos o início do talude continental. Essa região desempenha papel estratégico na manutenção da biodiversidade marinha, na regulação das condições climáticas, além de abrigar importantes reservas de recursos energéticos, minerais e pesqueiros, sendo também rota essencial para a navegação e o comércio exterior.

A plataforma continental brasileira, que corresponde a cerca de 67% do território terrestre do país, apresenta dimensão e diversidade comparáveis às da Amazônia Verde. Por esse motivo, passou a ser chamada de Amazônia Azul. No caso do Rio Grande do Norte, essa área é reconhecida como Amazônia Azul RN.

Com o intuito de ampliar e consolidar o conhecimento científico sobre essa região, foi criada em 2020, na UFRN, a Rede de Pesquisa Amazônia Azul RN. A iniciativa reúne grupos de pesquisa dedicados ao estudo da morfologia, dos tipos de solo e de rochas, da biodiversidade associada, bem como da regulação do uso dos recursos marinhos na zona costeira e na plataforma continental do estado.

Entre seus principais objetivos, destaca-se a criação de um banco de dados geoespacial, integrando informações resultantes de décadas de pesquisas institucionais. Esse acervo visa não apenas divulgar o conhecimento existente à sociedade, mas também fornecer subsídios para pesquisas futuras, apoiar a definição de alternativas locacionais e tecnológicas e contribuir para o Planejamento Espacial Marinho no Nordeste.

A princípio, o presente plano de trabalho tinha como objetivo central realizar o levantamento dos dados existentes e a criação de um banco de dados sobre a plataforma continental do Rio Grande do Norte. No entanto, as atividades foram direcionadas para as etapas 3 e 4, que compreendem desde o planejamento da arquitetura do banco de dados, incluindo formatos e metadados, até a adequação e/ou criação desses elementos para as informações disponibilizadas pela instituição. Dessa forma, os dados passam a ser padronizados e preparados para

publicação na plataforma de Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), constituída em uma iniciativa do Governo Federal do Brasil, instituída pelo Decreto nº 6.666, de 27 de novembro de 2008, cuja função de gerenciar e organizar informações espaciais tem se mostrado fundamental para subsidiar e divulgar pesquisas científicas brasileiras, apoiar a formulação de políticas públicas e orientar processos de tomada de decisão em investimentos futuros em pesquisa.

Metodologia

O presente plano de trabalho foi desenvolvido a partir de uma abordagem metodológica estruturada em etapas sequenciais, com o objetivo de organizar, adequar e disponibilizar dados produzidos pela UFRN referentes à plataforma continental do Rio Grande do Norte.

Na primeira etapa, procedeu-se a um estudo sobre a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), de forma a compreender seus princípios de funcionamento, padrões técnicos e requisitos para o armazenamento e publicação dos dados geoespaciais. Esse estudo possibilitou alinhar os objetivos do plano de trabalho às normas de interoperabilidade e às especificações exigidas para inserção no Diretório Brasileiro de Dados Geoespaciais (DBDG).

A segunda etapa, considerada central neste trabalho, correspondeu ao planejamento da arquitetura do banco de dados geoespacial. Nessa fase, definiu-se a estrutura lógica e conceitual do banco, priorizando a compatibilidade com os padrões da INDE. Foram selecionados os formatos mais adequados para o armazenamento e intercâmbio das informações, de acordo com a natureza dos dados do ambiente marinho.

A terceira etapa envolveu a correlação para a adequação e a criação de formatos e metadados, assegurando a conformidade das informações com os padrões da INDE. Essa fase contemplou a padronização dos dados de acordo com as normas nacionais e internacionais, com ênfase no Perfil de Metadados Geoespaciais do Brasil (MGB), baseado no padrão ISO 19115/19139 (ISO, 2014). Os metadados precisam ser estruturados em formato XML, por meio do software GeoNetwork, permitindo a catalogação e posterior integração com o Diretório Brasileiro de Dados Geoespaciais.

Por fim, estabeleceu-se como etapa contínua o processo de validação e atualização periódica dos dados, visando garantir a consistência, acessibilidade e interoperabilidade das informações publicadas. Essa prática assegura que os dados sobre a plataforma continental do Rio Grande do Norte permaneçam atualizados e disponíveis como subsídio para pesquisas científicas, políticas públicas e processos de planejamento costeiro e marinho.

Resultados e Discussões

A Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) constitui-se em uma iniciativa do Governo Federal do Brasil, instituída pelo Decreto nº 6.666, de 27 de novembro

de 2008, que visa organizar, padronizar e disponibilizar dados geoespaciais produzidos por diferentes instituições brasileiras. Seu objetivo principal é promover a interoperabilidade entre bases de dados, ampliando o acesso à informação espacializada e fornecendo subsídios para pesquisas científicas, tomadas de decisão e formulação de políticas públicas. A INDE opera de forma descentralizada, por meio do Diretório Brasileiro de Dados Geoespaciais (DBDG), e adota padrões nacionais e internacionais de metadados, como o Perfil MGB, baseado na norma ISO 19115 (BRASIL, 2008).

No contexto da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), constatou-se que, apesar da produção significativa de pesquisas voltadas ao ambiente marinho e costeiro — como levantamentos morfológicos, geológicos, oceanográficos e de biodiversidade —, esses dados ainda não se encontram estruturados em um banco de dados padronizado e interoperável nos formatos da INDE. A ausência dessa integração resulta em fragmentação das informações, dificultando tanto a visibilidade dos resultados de pesquisa quanto sua aplicação em processos de planejamento costeiro e marinho, além da formulação de políticas ambientais.

Para que os dados produzidos na UFRN possam ser incorporados à INDE, faz-se necessário o cumprimento de algumas etapas fundamentais. Primeiramente, a instituição deve aderir formalmente ao Diretório Brasileiro de Dados Geoespaciais (DBDG), coordenado pelo IBGE. Esse processo inicia-se com a formalização de uma solicitação de adesão, realizada através do envio de um termo oficial contendo as informações institucionais e a designação da equipe técnica responsável pela gestão dos dados e metadados. Após a aceitação, a instituição deve optar por uma das modalidades de integração — Nó Próprio, Nó Central ou Nó Misto — de acordo com sua capacidade técnica e infraestrutura disponível para o gerenciamento de catálogos e geosserviços. A etapa seguinte consiste na capacitação dos responsáveis, oferecida pelo Gestor do DBDG, envolvendo o uso de ferramentas como GeoNetwork para catalogação de metadados e GeoServer para publicação de geosserviços. Por fim, a instituição passa a disponibilizar suas informações geoespaciais de acordo com os padrões estabelecidos pela Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) e pelo Open Geospatial Consortium (OGC), assegurando a interoperabilidade e a ampla disseminação dos dados junto à sociedade e à comunidade científica. Além disso, torna-se indispensável a definição e conversão de formatos de dados geoespaciais compatíveis com os padrões estabelecidos pela INDE e amplamente aceitos em escala nacional e internacional.

No caso dos dados do ambiente marinho, destacam-se diferentes formatos recomendados em função da natureza da informação. Para dados vetoriais, como limites costeiros, áreas de proteção marinha e rotas de navegação, os formatos mais utilizados são o GeoPackage (.gpkg) e o Shapefile (.shp), sendo o primeiro preferencial por sua maior eficiência e interoperabilidade. Já os dados raster, como batimetria, temperatura, salinidade e imagens de satélite, são mais bem representados nos formatos GeoTIFF (.tif) e NetCDF (.nc), este último especialmente voltado a séries temporais e dados multidimensionais utilizados em oceanografia. Formatos adicionais, como CSV/XYZ para dados pontuais e HDF5 (.h5) para registros científicos complexos, também podem ser empregados conforme a natureza da pesquisa (ISO, 2014).

Conclusão

A adesão da UFRN à INDE representa um passo estratégico para disponibilizar uma base de dados abrangente sobre a plataforma continental do Rio Grande do Norte, fruto das pesquisas desenvolvidas pelo Grupo de Ciências do Mar e Ambientais. Embora esse acervo ainda demande processos de integração e padronização para atender plenamente aos requisitos da infraestrutura, a adoção de formatos adequados e a organização de um banco de dados geoespacial interoperável constituem etapas fundamentais. Tais ações permitirão fortalecer a produção científica da instituição, ampliar a visibilidade de seus resultados e contribuir de forma efetiva para o planejamento e a gestão sustentável do espaço marinho e costeiro potiguar, além de subsidiar estudos sobre a margem equatorial brasileira. Cabe destacar que o Serviço Geológico do Brasil (SGB), referência no mapeamento de áreas terrestres e marinhas, já integra seus dados à plataforma, tornando-os acessíveis online. Nesse contexto, a integração da UFRN à INDE colocaria a universidade entre as pioneiras do Nordeste a disponibilizar informações científicas em uma base nacional, reforçando sua relevância acadêmica e institucional.

Referências

BALANIUK, Remis; JARDIM, Rafael Simão de Moraes; FILGUEIRAS, Luiz Ricardo. **A infraestrutura nacional de dados espaciais: situação atual, riscos, fragilidades e oportunidades.** Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 26, n. 106, p. 52–70, ago. 2025. DOI:<https://doi.org/10.14393/RCG2610675725>. Disponível em:<https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/75725>. Acesso em: 15 ago. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 6.666 de 27 de novembro de 2008. Institui, no âmbito do poder executivo Federal, a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais - INDE.** Diário Oficial da União, Brasília: Poder Executivo, DF, Seção 1, p.57, 28 nov. 2008. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6666.htm. Acesso em: 20 ago. 2025.

ISO. **ISO 19115-1:2014 – Geographic information – Metadata – Part 1: Fundamentals.** 1. ed. Genebra: International Organization for Standardization, abr. 2014. 167 p. Disponível em:<https://www.iso.org/standard/53798.html>. Acesso em: 20 ago. 2025.

Anexos

CÓDIGO: ET1254

AUTOR: RAMON VINICIUS FERREIRA DE SOUZA

ORIENTADOR: BRUNO MARQUES FERREIRA DA SILVA

TÍTULO: Estudo e utilização de ROS2 com drones para tarefas de mapeamento

Resumo

Este trabalho investigou técnicas de mapeamento e localização visual em ambientes internos com drones, baseado em técnicas de processamento em tempo real e reconstrução tridimensional offline. Foram exploradas abordagens capazes de gerar mapas detalhados e estimar a posição e orientação de câmeras a partir de imagens. Os resultados demonstraram que é possível produzir representações consistentes do ambiente e realizar a localização, oferecendo suporte a aplicações de robótica autônoma, navegação e exploração de espaços. O estudo evidencia o potencial de sistemas integrados de percepção e mapeamento para futuras pesquisas e aplicações práticas em diferentes plataformas móveis.

Palavras-chave: Drones; ROS2; ORBSLAM; COLMAP; Visão Computacional; Mapeamento

TITLE: Study and use of ROS2 with drones for mapping tasks

Abstract

This work investigated techniques for visual mapping and localization in indoor environments using drones, based on real-time processing and offline three-dimensional reconstruction. Approaches capable of generating detailed maps and estimating the position and orientation of cameras from images were explored. The results demonstrated that it is possible to produce consistent representations of the environment and perform localization, supporting applications in autonomous robotics, navigation, and space exploration. The study highlights the potential of integrated perception and mapping systems for future research and practical applications across different mobile platforms.

Keywords: Drones; ROS2; ORBSLAM; COLMAP; Computer Vision; Mapping

Introdução

O avanço da tecnologia dos veículos aéreos não tripulados, popularmente conhecidos como drones, têm ganhado destaque em aplicações de áreas como agricultura de precisão, logística, segurança patrimonial e inspeção de infraestruturas. Esses dispositivos, dotados de câmeras e múltiplos sensores, possibilitam não apenas a captura de imagens aéreas, mas também a

integração com algoritmos de visão computacional para tarefas de navegação, mapeamento e localização.

Entre as principais técnicas aplicadas nesse contexto destacam-se os métodos de localização visual, nos quais, a partir de um mapa previamente construído e de uma imagem de consulta, é possível estimar a posição e a orientação de uma câmera em relação à cena observada. Complementarmente, o SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) permite que um robô construa, de forma simultânea, um mapa do ambiente enquanto determina sua própria localização. Ambas as abordagens são fundamentais para garantir autonomia a robôs móveis, especialmente em ambientes complexos e dinâmicos.

Com o suporte do ROS2 (Robot Operating System), uma ferramenta de robótica que permite a integração e comunicação entre diferentes aplicações, buscamos, neste estudo, compreender e aplicar ferramentas de mapeamento e localização visual em drones, explorando duas abordagens distintas: o ORBSLAM, um dos algoritmos mais consolidados para SLAM visual monocular em tempo real; e o COLMAP, uma ferramenta robusta para reconstrução 3D de ambientes a partir de um conjunto de imagens processadas offline.

Metodologia

A pesquisa foi realizada em um ambiente interno controlado, utilizando o drone educacional DJI Tello, disponível no laboratório TEAM da UFRN. O Tello é um drone de baixo custo, equipado com uma câmera integrada capaz de transmitir imagens em tempo real via Wi-Fi, o que o torna adequado para fins experimentais.

Como ferramenta de integração, adotou-se o ROS2, desempenhando o papel de camada intermediária, permitindo a comunicação entre os diferentes módulos que compõem o sistema. No ROS2, cada módulo é implementado como um nó capaz de publicar ou subscrever tópicos, o que viabiliza a troca de dados de maneira eficiente. Assim, o drone Tello foi configurado para publicar continuamente as imagens capturadas por sua câmera. Essas imagens, obtidas no ambiente interno do laboratório, foram consumidas pelo ORBSLAM, responsável pelo processamento em tempo real e pela geração de uma nuvem de pontos representando o ambiente. O resultado dessa etapa foi visualizado por meio do RVIZ, uma ferramenta nativa do ROS2 que permite acompanhar dinamicamente a reconstrução espacial.

Na segunda parte do estudo, voltada ao processamento offline, as imagens adquiridas pelo drone foram armazenadas e posteriormente processadas pelo COLMAP. Essa ferramenta realizou a extração e o casamento de descritores visuais, seguido da reconstrução da estrutura 3D do ambiente. O resultado obtido consistiu em uma nuvem de pontos tridimensional do laboratório. Também foi realizada a reconstrução com o COLMAP do Virtual Gallery Dataset, um conjunto sintético de imagens que representa uma galeria virtual.

Com a estrutura 3D da galeria virtual, testou-se o processo de localização visual através da ferramenta HLOC (Hierarchical Localization Toolbox), disponível na linguagem Python. O HLOC combina técnicas avançadas de extração de características, correspondência de descritores e estimativa de pose de câmera, permitindo determinar de forma precisa a posição e a orientação de imagens de consulta em relação ao mapa tridimensional previamente gerado.

Resultados e Discussões

Os experimentos demonstraram que o ORB-SLAM pode ser aplicado em drones, como o DJI Tello, embora apresente limitações importantes. O algoritmo mostrou-se capaz de realizar mapeamento e localização simultâneos em tempo real, ainda que sua inicialização exija um período considerável para estabilização. A integração com o ROS2 facilitou o fluxo de dados entre os módulos e permitiu a visualização imediata das nuvens de pontos no RVIZ, oferecendo feedback visual em tempo real sobre o ambiente mapeado.

No entanto, o ORB-SLAM demonstrou sensibilidade a movimentos bruscos do drone e a variações de iluminação, fatores que podem comprometer a robustez do mapeamento em condições adversas. Além disso, é importante destacar que o mapa gerado pelo ORB-SLAM não possui escala absoluta, uma vez que utiliza apenas uma câmera monocular. Essa limitação impede a realização de navegação autônoma, restringindo o uso do algoritmo a tarefas de mapeamento exploratório ou de suporte à localização relativa.

Por sua vez, o COLMAP, por ser uma ferramenta de processamento offline, apresentou resultados mais detalhados e robustos para reconstrução 3D. A partir do conjunto de imagens coletadas, foi possível gerar modelos tridimensionais consistentes, com maior densidade de pontos e precisão geométrica, o que é particularmente útil para aplicações que demandam alta fidelidade no mapeamento do ambiente.

O HLOC, utilizado para a localização visual, mostrou-se eficiente na estimativa precisa da posição e orientação de imagens de consulta em relação aos mapas tridimensionais previamente gerados. Ao ser aplicado sobre o Virtual Gallery Dataset, um conjunto sintético de imagens, o HLOC apresentou desempenho consistente, validando a eficácia do pipeline de localização visual e demonstrando seu potencial para integração futura em sistemas de navegação de drones e outras plataformas móveis.

Conclusão

O presente trabalho demonstrou a viabilidade do uso de drones em conjunto com algoritmos de visão computacional para tarefas de mapeamento e localização, evidenciando o potencial dessas tecnologias em aplicações de robótica autônoma. A utilização do ORBSLAM possibilitou a geração de mapas e a localização em tempo real, permitindo a avaliação dinâmica do ambiente, enquanto o COLMAP em conjunto com o HLOC destacou-se na reconstrução tridimensional detalhada dos cenários e na realização de localização visual offline, oferecendo maior precisão nos modelos gerados.

Como perspectivas futuras, sugere-se expandir os experimentos para incluir reconstruções mais amplas e detalhadas, como o mapeamento do campus da UFRN, permitindo que mapas tridimensionais sejam utilizados para a localização visual de múltiplas plataformas, incluindo drones, robôs terrestres, dispositivos móveis e sistemas de realidade aumentada. Além disso, o aprimoramento de algoritmos para lidar com condições adversas de iluminação e movimento pode ampliar a robustez e a aplicabilidade prática dessas soluções.

Referências

CAMPOS, C. et al. ORB-SLAM3: An accurate open-source library for visual, visual–inertial, and multi-map SLAM. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 37, n. 6, p. 1874–1890, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TRO.2021.3075644>

HORNUNG, A. et al. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Autonomous Robots*, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10514-012-9321-0>

LABBÉ, M.; MICHAUD, F. RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation. *Journal of Field Robotics*, v. 36, n. 2, p. 416–446, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/rob.21831>

MACENSKI, S. et al. The Marathon 2: A navigation system. In: *IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS)*, 2020. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2020.

OTTO, Alena et al. Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: a survey. *Networks*, v. 72, n. 4, p. 411–458, 2018.

SCHÖNBERGER, J. L.; FRAHM, J.-M. Structure-from-Motion revisited. In: *IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION (CVPR)*, 2016. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2016.

SARLIN, Paul-Edouard et al. From coarse to fine: Robust hierarchical localization at large scale. In: *IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION (CVPR)*, 2019. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2019.

WEINZAEPFEL, Philippe; CSURKA, Gabriela; CABON, Yohann; HUMENBERGER, Martin. Visual Localization by Learning Objects-of-Interest Dense Match Regression. In: *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019.

CÓDIGO: ET1331

AUTOR: EDUARDO KATSUO SILVA PAIXÃO

ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO PELLICER DE OLIVEIRA

TÍTULO: Deformação de sólidos elásticos sob efeito de forças externas.

Resumo

A Mecânica dos Meios Contínuos fornece a base teórica para descrever o comportamento de materiais deformáveis, sendo fundamental para diversas áreas da Física e Engenharia. No entanto, a complexidade de seu formalismo matemático pode, por vezes, ocultar suas fundações conceituais. Este trabalho de iniciação científica tem como objetivo a construção dedutiva e rigorosa do arcabouço matemático que descreve a deformação de sólidos elásticos. Partindo de conceitos fundamentais do cálculo de campos e da álgebra, desenvolvemos a cinemática da deformação, culminando na definição do tensor de deformação infinitesimal (ϵ_{ij}) como a medida da mudança de forma local. Em seguida, a partir dos axiomas de balanço e do Teorema da Tensão de Cauchy, introduzimos o tensor de tensões (σ_{ij}) como o objeto que descreve o estado de forças internas do material. O resultado é uma apresentação autocontida que elucida as bases físicas da elasticidade e estabelece as equações de movimento de Cauchy, demonstrando como o formalismo tensorial emerge como a linguagem natural para a descrição desses fenômenos.

Palavras-chave: Elasticidade, Tensor, Meios Contínuos.

TITLE: The Deductive Construction of Tensor Formalism for Elastic Solids

Abstract

Continuum Mechanics provides the theoretical basis for describing the behavior of deformable materials, being fundamental to various fields of Physics and Engineering. However, the complexity of its mathematical formalism can sometimes obscure its conceptual foundations. This undergraduate research work aims at the deductive and rigorous construction of the mathematical framework that describes the deformation of elastic solids. Starting from fundamental concepts of field calculus and algebra, we develop the kinematics of deformation, culminating in the definition of the infinitesimal strain tensor (ϵ_{ij}) as the measure of local shape change. Then, from the balance axioms and Cauchy's Stress Theorem, we introduce the stress tensor (σ_{ij}) as the object that describes the state of internal forces of the material. The result is a self-contained presentation that elucidates the physical foundations of elasticity and establishes Cauchy's equations of motion, demonstrating how the tensor formalism emerges as the natural language for the description of these phenomena.

Keywords: Elasticity, Tensor, Continuum Mechanics

Introdução

A capacidade de descrever e prever como os materiais se deformam sob a ação de forças externas é um dos pilares da física e da engenharia modernas. Desde a análise estrutural de

grandes construções civis até o desenvolvimento de novos biomateriais \cite{Sadd2005}, a compreensão do comportamento mecânico dos sólidos é indispensável. A teoria que unifica o estudo desses fenômenos é a Mecânica dos Meios Contínuos, que, através de uma elegante abstração, nos permite modelar a matéria como um contínuo, ignorando sua natureza atômica discreta e focando em suas propriedades macroscópicas \cite{Irgens2008}\cite{Bassalo1973}. Dentro deste vasto campo, a Teoria da Elasticidade se destaca ao descrever a classe de materiais que retornam à sua forma original após a remoção das cargas, um comportamento fundamental observado em inúmeras aplicações práticas \cite{Sadd2005}. Apesar da onipresença de suas aplicações, o formalismo matemático da Teoria da Elasticidade é notavelmente complexo e suas fundações conceituais são profundas. Frequentemente, estudantes e pesquisadores em início de carreira utilizam as equações da elasticidade como ferramentas prontas, sem uma apreciação completa da jornada dedutiva que justifica sua forma. A relação entre a deformação geométrica (uma medida cinemática) e a tensão interna (uma medida dinâmica) é descrita por objetos matemáticos sofisticados — os tensores \cite{Renteln2014} —, cuja necessidade e significado nem sempre são evidentes para estudantes. Existe, portanto, uma lacuna pedagógica e conceitual na transição dos princípios físicos fundamentais para o arcabouço matemático final.

Metodologia

Para atingir tal objetivo, o percurso metodológico deste artigo se dará em etapas lógicas e incrementais. Iniciaremos com uma análise puramente cinemática do movimento de um corpo contínuo. Ao investigar a mudança de forma na vizinhança de um ponto, derivaremos o tensor de deformação infinitesimal como a medida matemática precisa da distorção e dilatação local. Em seguida, passaremos à análise dinâmica, introduzindo o conceito de forças de superfície e, através do Teorema da Tensão de Cauchy, demonstraremos a existência do tensor de tensões, o objeto que descreve completamente o estado de forças internas em qualquer ponto do material. Finalmente, unificaremos a cinemática e a dinâmica através das leis de balanço, culminando na obtenção das equações de movimento de Cauchy, que governam o comportamento do sólido elástico. Dessa forma, este trabalho se apresenta como uma contribuição de natureza fundamental e pedagógica. Ao percorrer essa jornada construtiva, oferecemos uma apresentação autocontida que não apenas solidifica a compreensão das bases da Teoria da Elasticidade, mas também serve como uma ponte entre a matemática abstrata da álgebra tensorial e sua manifestação concreta na descrição do mundo físico. Para o estudante de ciências e engenharia, este estudo visa transformar ferramentas de cálculo em intuição física e conceitos físicos em uma estrutura matemática elegante e poderosa.

Resultados e Discussões

Para a análise de movimentos de corpos sólidos, é uma boa aproximação considerar a matéria como um meio contínuo. \ Seja $\vec{r}(\vec{r}_0, t)$ a posição da partícula. Derivando a posição em relação ao tempo, obtemos:
$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}(\mathbf{r}, t),$$
 \noindent que, notoriamente, é a velocidade do corpo. Para derivar a aceleração, precisamos utilizar a regra da cadeia. Assim, escrevemos:
$$\mathbf{a} = \dot{\mathbf{v}} = (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t},$$
 \noindent e chamamos o operador $\frac{d}{dt}$, nesse contexto, de Derivada Material . Ou seja:

$$\frac{d}{dt} \equiv \mathbf{v} \cdot \nabla + \frac{\partial}{\partial t}.$$
 Para uma grandeza extensiva, a derivada material pode ser deduzida como sendo (Irgens2008) (Bassalo1973):

$$\dot{F}(t) = \iiint_V \mathbf{f}(\mathbf{r}, t) \rho dV.$$
 \section{Dinâmica e deformações} \subsection{Equações do movimento e Lema de Cauchy}
 A partir da Mecânica Newtoniana de um sistema de partículas, Euler sugeriu dois axiomas que estendem a teoria para meios contínuos:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{p}} &= \iiint_V \mathbf{a} \rho dV \quad \text{(Axioma 1. Segunda Lei de Newton)} \\ \dot{\mathbf{m}_O} &= \iiint_V \mathbf{r} \times \mathbf{a} \rho dV \quad \text{(Axioma 2. Conservação do momento)}. \end{aligned}$$
 Desses dois axiomas, chegamos à 3ª Lei de Newton como consequência. As duas grandezas intensivas relacionadas às forças que um corpo pode ser submetido são $\mathbf{b}(\mathbf{r}, t)$ e $\mathbf{t}(\mathbf{r}, t, \hat{n})$. Para descrever o comportamento de um corpo sólido, vamos levar em consideração as duas contribuições:

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= \iint_A \mathbf{t} dA + \iiint_V \mathbf{b} \rho dV \quad \text{(força resultante)} \\ \mathbf{p} &= \iiint_V \mathbf{v} \rho dV \quad \text{(momento linear)} \end{aligned}$$
 \label{eq: definicao_grandezas_dinamica}
 Essas equações são capazes de descrever todo o movimento de um sólido elástico, isto é, sua translação, rotação e deformação. Se considerarmos uma seção transversal de um sólido qualquer, teremos, nos dois lados dessa área, uma tensão atuando. Se o sistema estiver em equilíbrio, a soma das forças (em cada lado da seção) sobre a superfície deve ser nula. Isso nos leva ao lema de Cauchy:

$$\mathbf{t}(\mathbf{r}, t, \hat{n}) = \mathbf{t}(\mathbf{r}, t, -\hat{n}),$$
 que demonstra que a tensão nos dois lados de uma superfície possui a mesma intensidade, mas direções opostas.
 \subsection{Equações de Campo de Cauchy}
 Considere a figura abaixo. Podemos escrever as tensões em três faces arbitrárias como:

$$\mathbf{t}_k = \mathbf{T}_{ik} \mathbf{e}_i.$$
 \begin{center} \vspace{1cm}
 \includegraphics[width=0.8\linewidth]{figures/tensao_num_continuo.jpeg}
 \captionof{figure}{Coordenadas de Tensão (Sadd2005)} \vspace{1cm}
 \end{center}
 Buscando o estado de tensão de uma partícula, chegamos ao Teorema de Cauchy (Irgens2008). Se $\hat{n} = \sum_{k=1}^3 n_k \mathbf{e}_k$ e $\mathbf{t} = t_i \mathbf{e}_i$, então:

$$t_i = \sum_{k=1}^3 T_{ik} n_k.$$
 Matematicamente, isso representa uma transformação linear de $\hat{n}$ em $\mathbf{t}$, onde a matriz associada é a matriz de tensões (T_{ij}) . Nos referimos a essa matriz como \textbf{Tensor de Tensões}. Assim, podemos reescrever o teorema como:

$$\mathbf{t} = \mathbf{T} \cdot \hat{n}.$$
 Podemos projetar a tensão $\mathbf{t}$ na direção normal ao plano e em alguma direção arbitrária ($\mathbf{e}$) tangente à superfície:

$$\begin{aligned} \sigma &= \hat{n} \cdot \mathbf{t} = \hat{n} \cdot \mathbf{T} \cdot \hat{n} \\ \tilde{\tau} &= \mathbf{e} \cdot \mathbf{T} \cdot \hat{n} \\ \mathbf{e} \cdot \mathbf{T} \cdot \hat{n} & \end{aligned}$$
 Usando a equação \eqref{eq: axioma1_euler} e a definição de força resultante em \eqref{eq: definicao_grandezas_dinamica}, calculamos a contribuição de forças na direção de $\mathbf{e}_i$:

$$\sum_{k=1}^3 \frac{\partial T_{ik}}{\partial x_k} + b_i \rho = a_i \rho, \quad \text{para todo } i = 1, 2, 3.$$
 Repare que a representação vetorial da equação acima sugere uma nova operação, algo que possui a estrutura do divergente de um vetor. No entanto, para as três dimensões, temos um vetor cujos componentes são $\sum_{k=1}^3 \frac{\partial T_{ik}}{\partial x_k}$. Logo:

$$\nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{b} \rho =$$

$\mathbf{a} \propto \text{(Equações de Campo de Cauchy)}$. \end{equation}

Análise de Deformação As relações de deslocamento de uma partícula, em relação a outra - arbitrária - podem ser dadas por:

$$\mathbf{u} + \mathbf{r} = \mathbf{u}^0 - \mathbf{r}' \quad \& \quad \mathbf{r} - \mathbf{r}' \equiv \Delta \mathbf{r} = \mathbf{u} - \mathbf{u}^0. \quad \text{eq: variacao_posicao_P_P0}$$

O vetor $\Delta \mathbf{r}$ representa a variação da posição da partícula em relação à outra. Expandindo em Séries de Taylor o campo $\mathbf{u}$:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^0 + J[\mathbf{u}] \cdot \mathbf{r} \quad \text{eq: deslocamento_P}$$

ou, ainda:

$$\Delta r_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial u_i}{\partial x_j} x_j, \quad \text{eq: componente_variacao_posicao}$$

(transformação de coordenadas)

Como a matriz relacionada à transformação acima é a Jacobiana, nesse contexto chamamos $J[\mathbf{u}]$ de **Tensor Gradiente de Deslocamento** (Sadd2005). Isso se justifica, pois a matriz jacobiana condensa em um único objeto toda a informação sobre como o vetor deslocamento varia localmente no espaço.

Decompondo $J[\mathbf{u}]$ em uma parcela simétrica e outra antissimétrica, obtemos:

$$J_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

Chamamos a parcela simétrica de **Matriz de Deformação**, e denotamos por ϵ_{ij} . A parcela antissimétrica é chamada de **Matriz de Rotação**, e denotamos por ω_{ij} . Assim:

$$J_{ij} = \epsilon_{ij} + \omega_{ij}.$$

A partir das equações (eq: variacao_posicao_P_P0) e (eq: componente_variacao_posicao), encontramos que:

$$u_i - u_i^0 = \sum_{j=0}^3 \frac{\partial u_i}{\partial x_j} x_j = \epsilon_{ij} + \omega_{ij},$$

escrevemos:

$$u_i = u_i^0 + \sum_{j=1}^3 (\epsilon_{ij} + \omega_{ij}) x_j.$$

Aqui, levamos em conta a translação ($\mathbf{u}^0$), a deformação (ϵ_{ij}) e a rotação (ω_{ij}) do corpo.

Fundamentos da Álgebra Multilinear

Produto Tensorial e generalização de Tensor Até o momento, os conceitos matemáticos que vimos dizem respeito à Álgebra Linear, que estuda como os Espaços Vetoriais são mapeados entre si ou qual a distância entre os elementos dentro de um mesmo espaço. O objeto de estudo da Álgebra Linear é o vetor. Neste momento, iremos introduzir os conceitos de uma nova álgebra, que é a Álgebra Multilinear, cujos objetos de estudo são os tensores. Para termos um vislumbre de como, mais ou menos, funciona a Álgebra Multilinear, podemos tomar como exemplo a forma bilinear. Uma forma bilinear é uma função $g: V \times V \rightarrow \mathbb{F}$. Dizemos bilinear, pois essa função é linear nas duas entradas, como vimos. Imagine isso para uma quantidade arbitrária de entradas. É neste contexto que construímos a Álgebra Multilinear.

Um tensor é um objeto matemático que generaliza o vetor. Definimos um tensor por ordens, de modo que um tensor de ordem 1 é um vetor e um tensor de ordem 0 é um escalar. A partir dessa definição, podemos ter uma ideia, apesar de abstrata, do que é um tensor. O **Produto Tensorial** é uma operação efetuada entre dois tensores de modo que o resultado da operação é um tensor de ordem igual à soma das ordens dos tensores de entrada. Por exemplo, considere dois vetores $\mathbf{v}$ e $\mathbf{w}$. O produto tensorial entre esses vetores, representado por $\mathbf{v} \otimes \mathbf{w}$, resulta em um tensor de ordem 2 (ou 2-tensor).

O produto tensorial é uma operação não comutativa e associativa. Significa que:

$$\mathbf{v} \otimes \mathbf{w} \neq \mathbf{w} \otimes \mathbf{v}$$

$$\mathbf{v} \otimes \mathbf{w} \otimes \mathbf{u} = \mathbf{v} \otimes (\mathbf{w} \otimes \mathbf{u})$$

$$(\mathbf{v} \otimes \mathbf{w}) \otimes \mathbf{u} = \mathbf{v} \otimes (\mathbf{w} \otimes \mathbf{u})$$

$\otimes \vec{u}$. Se isso é verdade, então não é difícil notar que o conjunto $\mathcal{T}^r$ de todos os tensores de ordem r é naturalmente um Espaço Vetorial. Considere dois r -tensores T e S . Veja que a operação $aT + bS$ é fechada. Isso naturalmente implica que $\mathcal{T}^r$ é um Espaço Vetorial. Uma maneira de representar o espaço $\mathcal{T}^r$ é:
$$\mathcal{T}^r = V \otimes V \otimes \dots \otimes V = V^{\otimes r}.$$
 Essa definição nos leva a concluir que, se T e S são tensores de ordens diferentes, e R é um tensor de mesma ordem que S , podemos escrever:
$$\begin{aligned} & (R + S) \otimes T = R \otimes T + S \otimes T \\ & (R + S) \otimes T = R \otimes T + S \otimes T \\ & (aT) \otimes S = a(T \otimes S) = (aT) \otimes S. \end{aligned}$$
 A álgebra dos tensores se assemelha à álgebra de polinômios. Os polinômios formam um Espaço Vetorial e, quando multiplicamos dois polinômios, obtemos um polinômio de grau maior. Aqui é semelhante, mas o que faz papel de multiplicação é essa nova operação chamada produto tensorial. Note o fato de que um conjunto de tensores ser definido em cima de um Espaço Vetorial implica que ele próprio é um Espaço Vetorial, e é natural pensar que um tensor qualquer possa ser escrito como a combinação linear de outros tensores. Não só isso, é natural pensar que existe um conjunto de tensores denominados de base desse espaço. Vamos considerar um primeiro caso mais intuitivo. Seja $\{\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$ uma base do $\mathbb{R}^3$. Assim, uma base canônica do $\mathbb{R}^3 \otimes \mathbb{R}^3$ é o conjunto $\{\vec{e}_i \otimes \vec{e}_j\}$, com $i, j = 1, 2, 3$. Assim, um tensor arbitrário $T \in \mathbb{R}^3 \otimes \mathbb{R}^3$ pode ser escrito como:
$$T = \sum_{i,j=1}^3 T^{ij} \vec{e}_i \otimes \vec{e}_j.$$
 Como normalmente se fixam as bases desse espaço vetorial de tensores, pode-se pensar apenas no índice escalar dessa combinação. É comum se referir a tensores apenas pelas componentes T^{ij} , no entanto, o objeto tensor é o todo, dado pela equação acima. Podemos observar que o tensor $\vec{v} \otimes \vec{w}$ é escrito como:
$$\left(\sum_i v^i \vec{e}_i \right) \otimes \left(\sum_j w^j \vec{e}_j \right) = \sum_{ij} v^i w^j (\vec{e}_i \otimes \vec{e}_j).$$
 Essa representação nos faz pensar que talvez as componentes de um tensor de ordem 2 possam ser escritas em uma matriz. Isso é verdade, veja:
$$\mathbf{A} = (v^i w^j) = \begin{bmatrix} v^1 w^1 & v^1 w^2 & \dots & v^1 w^n \\ v^2 w^1 & v^2 w^2 & \dots & v^2 w^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v^m w^1 & v^m w^2 & \dots & v^m w^n \end{bmatrix}.$$
 Cada linha, ou coluna, dessa matriz é uma combinação linear de certos números. Poderíamos escrever isso de outra maneira:
$$\mathbf{A} = \mathbf{v} \mathbf{w}^T.$$
 Isso nos leva a concluir que todo tensor escrito como produtos tensoriais de qualquer quantidade de vetores possui posto 1, ou seja, suas componentes são linearmente dependentes entre si. Além disso, podemos perceber que quanto maior a ordem do tensor, maior o número de índices das suas componentes. Por exemplo, um 5-tensor possui componentes com 5 índices.
Eu poderia explicar melhor o que significa o posto de uma matriz. Anteriormente, já vimos um objeto que se comporta como um tensor, da maneira como estamos definindo. O objeto da equação eq: tensor_cauchy é um tensor de tensões, também chamado de é mesmo? Tensor de Cauchy. No entanto, note que, nesse contexto, estamos falando das componentes σ_{ij} de um tensor com uma base bem definida. Podemos, agora, generalizar essa ideia de tensores. Podemos correlacionar tensores com elementos duais de um espaço V . Desse modo, generalizamos um tensor para um objeto de multi-graus, de modo que o primeiro grau se refere à quantidade de vetores de V e o segundo se refere à quantidade de covetores de V^* . Ou seja, um tensor do tipo (r,s) pertence ao conjunto:
$$\mathcal{T}_r^s = V \otimes V \otimes \dots \otimes V \otimes V^* \otimes V^* \otimes \dots$$

$\otimes V^* = V \otimes r \otimes (V^*)^{\otimes s}$. O que antes chamamos de r -tensor é apenas um tensor de ordem $(r,0)$. Desse modo, se S é um tensor do tipo (r,s) e T é um tensor do tipo (p,q) , o tensor $S \otimes T$ será um tensor do tipo $(r+p,s+q)$. Analogamente a como fizemos anteriormente, se tomarmos uma base $\{\vec{e}_i\}$ de V e uma base $\{\theta^j\}$ de V^* , podemos escrever uma base do espaço $\mathcal{T}_r^s$ como:

$$\vec{e}_{i_1} \otimes \vec{e}_{i_2} \otimes \dots \otimes \vec{e}_{i_r} \otimes \theta^{j_1} \otimes \theta^{j_2} \otimes \dots \otimes \theta^{j_s}.$$

O duplo índice serve apenas para sabermos se o elemento que estamos tratando é um vetor ou um covetor. Podemos tomar um exemplo simples. Seja $\mathcal{T}_2^1: V \otimes V \otimes V^*$. Assim, se $\vec{v}, \vec{w} \in V$ e $f \in V^*$, temos:

$$\left(\sum_i v^i \vec{e}_i \right) \otimes \left(\sum_k w^k \vec{e}_k \right) \otimes \left(\sum_j f_j \theta^j \right) = \sum_{ijk} v^i w^k f_j (\vec{e}_i \otimes \vec{e}_k \otimes \theta^j) = \sum_{ijk} T^{ik}_j (\vec{e}_i \otimes \vec{e}_k \otimes \theta^j).$$

Neste exemplo, temos $\vec{e}_{i_1} = \vec{e}_i$, de modo que, quando $i_1 = 1$ temos $i=1$. Analogamente, para a base dual, $\theta^{j_1} = \theta^j$. Parece algo sem sentido. No entanto, para tensores de ordens muito grandes é melhor que tenhamos uma notação que não necessite de um grande número de letras. Assim, definindo $i \equiv i_1$, $k \equiv i_2$ e $j \equiv j_1$, escrevemos o tensor acima como:

$$\vec{v} \otimes \vec{w} \otimes f = \sum_{\substack{i_1 i_2 \\ j_1}} T^{i_1 i_2}_{j_1} (\vec{e}_{i_1} \otimes \vec{e}_{i_2} \otimes \theta^{j_1}).$$

Isso nos leva à escrever um tensor arbitrário como:

$$T = \sum_{\substack{i_1 \dots i_r \\ j_1 \dots j_s}} T^{i_1 \dots i_r}_{j_1 \dots j_s} (\vec{e}_{i_1} \otimes \dots \otimes \vec{e}_{i_r} \otimes \theta^{j_1} \otimes \dots \otimes \theta^{j_s}).$$

tensor_geral

Mudança de Base de um Tensor Do modo como estamos definindo tensores, parece natural pensar que uma mudança de base seguirá um padrão semelhante ao que vimos para vetores:

$$v'^i = \sum_j (A^{-1})^i_j v^j.$$

No entanto, essa notação fica um tanto confusa para tensores, pois os índices dos tensores é que são covariantes ou contra-variantes. Como cada índice do tensor corresponde a uma base específica, a mudança de base ocorre em cada elemento correspondente a um índice do tensor. Desse modo, é conveniente colocar o " " no índice que está ocorrendo a mudança de base. Assim, a equação acima ficaria:

$$v'^i = \sum_j (A^{-1})^i_j v^j.$$

Nessa perspectiva, podemos denotar a mudança de base de um tensor genérico como:

$$T'^{i_1 \dots i_r}_{j_1 \dots j_s} = \sum_{\substack{i_1 \dots i_r \\ j_1 \dots j_s}} T^{i_1 \dots i_r}_{j_1 \dots j_s} (A^{-1})^{i_1}_{j_1} \dots (A^{-1})^{i_r}_{j_r} A^{j_1}_{j_1'} \dots A^{j_s}_{j_s'},$$

onde cada matriz se refere a uma mudança de base dos elementos correspondentes a um índice do tensor. Note que, para elementos covariantes, a mudança de base está relacionada com uma matriz mudança de base A . Por outro lado, para elementos contra-variantes, a mudança de base está relacionada com a inversa de A , consistente com nossa construção conceitual até o momento. Deste modo, dada uma componente qualquer T^{312}_{134} , para nos referirmos à componente em outro sistema de coordenadas relacionada a esta, escrevemos $T^{3'2'1'}_{1'3'4'}$.

Tensor como uma Transformação Multilinear Ao longo desse texto, vimos diferentes tipos de funções que se relacionam de diferentes maneiras com Espaços Vetoriais e corpos escalares. Especificamente, podemos citar a Transformação Linear (T), o Determinante (f) e o Produto Interno (g), onde:

$$T: V \rightarrow W$$

$$f: V^n \rightarrow \mathbb{R}$$

$$g: V^2 \rightarrow$$

$\mathbb{R}$. Vamos considerar um produto interno g , definido da seguinte maneira: $g(\vec{v}, \vec{u}) = 3v_1 u_1 + 2v_1 u_2 + 2v_2 u_1 + 5v_2 u_2$. Seja a base $\{(1,0), (0,1)\} = \{\vec{e}_1, \vec{e}_2\}$. Assim: $g(\vec{e}_1, \vec{e}_1) = 3$, $g(\vec{e}_1, \vec{e}_2) = 2$, $g(\vec{e}_2, \vec{e}_1) = 2$, $g(\vec{e}_2, \vec{e}_2) = 5$. Repare que o que temos é um objeto semelhante às componentes de um tensor: $(g_{ij}) = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 2 & 5 \end{bmatrix}$. Desse modo, estamos interessados em uma generalização de funções como essa. Felizmente, podemos retornar à definição de tensores e ver que esse objeto, "tensor", não generaliza apenas os vetores, mas também as transformações. Cabe notar que, como vimos, mesmo as transformações lineares formam um Espaço Vetorial, então, no fundo, ainda estamos tratando de uma generalização de vetores. Considere uma transformação T que explora o isomorfismo entre V e V^* , ou seja, seja $T: V^* \times V^* \times \dots \times V \times \dots \times V \rightarrow \mathbb{R}$. Dizemos que essa transformação é multilinear se ela for linear em cada entrada: $T(\vec{v}_1, \dots, a\vec{u} + b\vec{w}, \dots, \vec{v}_{r+s}) = aT(\vec{v}_1, \dots, \vec{u}, \dots, \vec{v}_{r+s}) + bT(\vec{v}_1, \dots, \vec{w}, \dots, \vec{v}_{r+s})$, onde os vetores $\vec{v}_i$ representam vetores ou covetores conforme conveniente. O conjunto de todas essas transformações é um Espaço Vetorial Linear e denotamos por $\tilde{\mathcal{T}}_s^r$.

Conclusão

Neste trabalho, reconstruímos de forma dedutiva o formalismo matemático que descreve a deformação de sólidos elásticos a partir dos princípios da Mecânica dos Meios Contínuos. Partindo da hipótese do contínuo, definimos a derivada material e as equações de movimento, mostrando como os axiomas de Euler conduzem naturalmente ao Lema e às Equações de Campo de Cauchy. A introdução do tensor de tensões e do tensor gradiente de deslocamento permitiu separar, de maneira clara, os efeitos de translação, rotação e deformação. Assim, o percurso apresentado não apenas fundamenta as equações clássicas da elasticidade, mas também evidencia a estrutura lógica que conecta conceitos cinemáticos e dinâmicos. Acreditamos que este tratamento, ao mesmo tempo rigoroso e didático, pode servir como referência para estudantes e pesquisadores em formação, fortalecendo a intuição física por trás da linguagem tensorial.

Referências

\bibitem{Sadd2005} Martin H. Sadd. \textit{Elasticity: Theory, Applications and Numerics}. Elsevier, 1rd edition, 2005. \bibitem{Irgens2008} Fridtjov Irgens. \textit{Continuum Mechanics}. Springer, 2008. \bibitem{Bassalo1973} J. M. Bassalo. \textit{Introdução à Mecânica dos Meios Contínuos}. Editora da UFPA, 1973. \bibitem{Renteln2014} Paul Renteln. \textit{Manifolds, Tensors and Forms: an Introduction for Mathematicians and Physicist}. Cambridge, 2014.

CÓDIGO: ET1344

AUTOR: MARIA VITÓRIA ALVES BATISTA

ORIENTADOR: ELISAMA VIEIRA DOS SANTOS

TÍTULO: Síntese e Caracterização de Heterojunção de Nb₂O₅ com Nanopartícula Metálica para Aplicações Fotocatalíticas

Resumo

Uma heteroestrutura versátil de Nb₂O₅/Ni, adequada para diferentes processos, foi sintetizada com sucesso pela adição de Ni(NO₃)₂ ao processo de síntese Pechini de Nb₂O₅. Os materiais sintetizados foram caracterizados por espectroscopia de Absorção no Ultravioleta-Visível (DRS UV-Vis), cronoamperometria e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS), utilizando os materiais depositados em uma placa de ITO por método de imersão (dip-coating). A partir das caracterizações destes materiais foi possível verificar que as propriedades do material foram fortemente afetadas pela dopagem do Nb₂O₅ com Ni. A heteroestrutura (Nb₂O₅/Ni) apresentou desempenho fotoeletrocatalítico superior ao Nb₂O₅ puro, mostrando respostas de fotocorrentes superiores. Nossos resultados indicam que o Nb₂O₅/Ni tem potencial para aplicação em fotoeletrocatalise, permitindo promover reações nos processos oxidativos e redutivos.

Palavras-chave: Nb₂O₅, fotoeletrocatalise

TITLE: Synthesis and Characterization of Nb₂O₅ Heterojunction with Metallic Nanoparticles for Photocatalytic Applications

Abstract

A versatile Nb₂O₅/Ni heterostructure, suitable for different processes, was successfully synthesized by adding Ni(NO₃)₂ to the Pechini synthesis process of Nb₂O₅. The synthesized materials were characterized by Ultraviolet-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS UV-Vis), chronoamperometry, and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), using materials deposited on an ITO plate by the dip-coating method. From the characterizations of these materials, it was possible to observe that the properties of the material were strongly influenced by the doping of Nb₂O₅ with Ni. The heterostructure (Nb₂O₅/Ni) exhibited superior photoelectrocatalytic performance compared to pure Nb₂O₅, showing higher photocurrent responses. Our results indicate that Nb₂O₅/Ni has potential for application in photoelectrocatalysis, enabling the promotion of reactions in both oxidative and reductive processes.

Keywords: Nb₂O₅, photoelectrocatalysis

Introdução

O desenvolvimento sustentável e a economia circular estão intrinsecamente ligados, abordando a importância da gestão adequada das matérias-primas e a busca contínua por tecnologias e materiais inovadores. Essa abordagem integrada não apenas preserva o meio ambiente, mas também promove um desenvolvimento econômico mais resiliente e sustentável [1,2]. À medida que os riscos ambientais se intensificam e a conscientização global cresce, empresas e pesquisadores estão cada vez mais adotando estratégias e planos para se adaptarem melhor à consecução dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

As reações de redução são de grande interesse industrial, como por exemplo a produção de hidrogênio, conversão de CO₂ a produtos de alto valor agregado além da obtenção de NH₃. Nesse contexto, técnicas como a eletrocatalise [3,4] e a fotoeletrocatalise [5,6] têm-se destacado na literatura. A fotocatalise é crucial para o desenvolvimento da remediação de águas residuais e de novas fontes de energia viáveis. [7,8] Nanopartículas de metais como níquel, podem atuar como reservatórios de elétrons devido às suas propriedades eletrônicas únicas. Em nanoescala, essas partículas exibem uma alta densidade de estados superficiais, o que facilita a captura e o armazenamento temporário de elétrons fotoexcitados. Esse comportamento é crucial em processos fotocatalíticos, onde a separação eficiente de portadores de carga é essencial para melhorar o desempenho. Além disso, a alta condutividade elétrica dessas nanopartículas permite a rápida transferência de elétrons, reduzindo a recombinação de elétrons e buracos e-h⁺ e prolongando a vida útil dos portadores de carga [6]. Consequentemente, a incorporação dessas nanopartículas em materiais fotocatalíticos pode aumentar significativamente a eficiência de processos como a degradação de poluentes orgânicos e a conversão de energia solar em energia química.

O objetivo deste estudo é preparar as heteroestruturas Nb₂O₅/Ni, utilizando o método Pechini, e realizar suas caracterizações de superfície, fotoeletroquímica e atividade fotocatalítica. O Nb₂O₅/Ni, foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de espalhamento de elétrons (EDS) para determinar a estrutura, as propriedades ópticas e a morfologia. Além disso, estudos fotoeletroquímicos foram realizados através de medições eletroquímicas por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), voltametria cíclica com sonda redox de ferro ferrosico e cronoamperometria) no escuro e sob irradiação de luz visível para examinar as atividades dos materiais sintetizados. Investigações eletroquímicas foram realizadas para fornecer uma visão geral das possíveis aplicações desse material, demonstrando sua versatilidade para fins ambientais. Nesse contexto, o presente plano visa preparação e caracterização, morfológica e eletroquímica, de eletrodo a base de Nb₂O₅ dopado com Ni, a fim de compreender as informações necessárias para aplicar esses materiais como fotoeletrocatalisadores, com o intuito de atingir as ODS 6, 7 e 9.

Metodologia

Metodologia

2. Materiais e métodos

2.1 Produtos químicos

Os produtos químicos utilizados, incluindo etilenoglicol (C₂H₆O₂), ácido cítrico (C₆H₈O₇) e álcool isopropílico (C₃H₈O), foram adquiridos da Sigma-Aldrich (Brasil), enquanto o

oxalato de nióbio amoniacal ($\text{NH}_4\text{H}_2[\text{NbO}(\text{C}_2\text{O}_4)_3] \cdot \text{H}_2\text{O}$) foi fornecido pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (Brasil). Todos os componentes químicos são de grau analítico e são utilizados sem qualquer processamento adicional.

2.2 Síntese de heterojunções Nb_2O_5 , $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ni}$

O Nb_2O_5 foi preparado pela metodologia Pechini, conforme descrito no fluxograma da Fig. 1a, adicionando 2,16 g de ácido cítrico a 20 mL de água destilada a 50 °C. Após a dissolução completa do ácido cítrico, foram adicionados 3,08 g de oxalato de nióbio e a solução foi mantida a 50 °C por 30 minutos. Posteriormente, foram adicionados 7,0 g de etilenoglicol e a temperatura foi elevada para 70 °C, com agitação constante da solução por 30 minutos [12]. A solução foi então transferida para um forno de mufla, começando à temperatura ambiente, e mantida a 600 °C por 2 h para obter a estrutura ortorrômbica (T- Nb_2O_5). O material foi moído após ser removido do forno. Para a decoração das nanopartículas de Ni na estrutura T- Nb_2O_5 (Fig. 1b), foram utilizadas quantidades selecionadas de NiNO_3 (10%). Posteriormente, 0,5 g de Nb_2O_5 foi dissolvido em 20 mL de etanol e 0,03 g de ácido tânico, a solução foi transferida para um forno de mufla a 200 °C por 14 h. Os compósitos $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ni}$ foram preparados com quantidades desejadas de Ni.

2.3 Caracterização das heterojunções Nb_2O_5 , $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ni}$

A estrutura cristalina dos materiais sintetizados foi analisada utilizando um difratômetro de raios X Bruker D2Phaser equipado com um detector Lynxeye e radiação de cobre (Cu K , $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) com um filtro de Ni, corrente de 10 mA e tensão de 30 kV. Os padrões de XRD foram observados no valor 2θ na faixa de 10–80°, fenda divergente: 0,6 mm, fenda central: 1 mm, passo: 0,01° e tempo de aquisição de 0,3 s. A morfologia e a composição química dos materiais foram estudadas utilizando microscopia eletrônica de varredura (SEM; Carl Zeiss, Auriga, Oberkochen, Alemanha) e uma análise por espectroscopia de energia dispersiva realizada por um microscópio eletrônico de varredura (EDS, Bruker, detector XFlash, Billerica, MA, EUA).

2.3 Caracterização eletroquímica das heterojunções Nb_2O_5 , $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ni}$

A análise eletroquímica foi realizada utilizando um sistema convencional de três eletrodos. Primeiro, os filmes de Nb_2O_5 , $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ni}$, N foram depositados em substratos de óxido de índio-estanho (ITO) utilizando o método de revestimento por imersão, conforme descrito. Antes disso, 80 mg de Nb_2O_5 , $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ni}$, foram espalhados em 40 mL de álcool isopropílico a 60% e dispersos por processo ultrassônico durante 60 minutos. Depois disso, o vidro ITO ($25 \times 75 \times 1,1 \text{ mm}$) foi mergulhado a uma velocidade de tração de 2 mm s^{-1} . As caracterizações eletroquímicas EIS, foi medida com um potenciostato-galvanostato Autolab modelo PGSTAT 30. Nb_2O_5 , O $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ni}$, foram aplicados como eletrodos de trabalho individualmente e um fio de platina e um Ag/AgCl como contra-eletrodo e eletrodo de referência, respectivamente. A solução eletrolítica era $50 \text{ mmol L}^{-1} \text{ Na}_2\text{SO}_4$ e não foi agitada durante as medições. Em condições de luz e escuridão, as medições LSV foram realizadas entre $-0,5$ e $+1,5 \text{ V}$ a uma taxa de varredura de 10 mV s^{-1} . Os dados EIS foram registrados com $+1,5 \text{ V}$, perturbação de potencial sinusoidal de amplitude em uma faixa de frequência de 0,1 Hz a 100 kHz. A EIS foi usada para determinar a resistência de

transferência, e a análise de Mott-Schottky (MS) a 10 Hz também foi realizada. Além disso, a técnica de voltametria cíclica foi empregada durante o processo de caracterização, observando-se inicialmente o perfil voltamétrico na presença de Na_2SO_4 (0,5 M) e, subsequentemente, a análise usando a sonda redox de ferro. Além disso, também foram realizadas medições cronoamperométricas definindo o potencial em +1,10 V. As medições de fotocorrente transitória e EIS foram realizadas sob iluminação, enquanto a análise Mott-Schottky foi realizada no escuro. As medições fotoeletroquímicas foram realizadas utilizando lâmpadas UVC, UVA e LED.

Resultados e Discussões

As imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) são apresentadas na Figura 4 para os materiais Nb_2O_5 (a) e $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ni}$ (b). Observa-se que ambas as amostras apresentam partículas com morfologia irregular e estrutura aglomerada. A dopagem com níquel parece influenciar a organização superficial, indicando uma possível formação de cristais mais organizados, o que pode favorecer propriedades como maior área de contato com o eletrólito.

A análise composicional realizada por Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDS), apresentada na Figura 5, confirma a presença de Nb e O em ambas as amostras. No entanto, somente o material dopado (b) exibe o pico correspondente ao níquel (Ni), evidenciando a incorporação bem-sucedida.

A Figura 6 mostra as fotocorrentes em função do tempo para Nb_2O_5 (Figura a) e $\text{Nb}_2\text{O}_5/1\text{Ni}$ (Figura b), medidos em solução de H_2SO_4 (50 mmol L^{-1}) a +1,1 V. As medições foram feitas sob irradiação de luz visível (LED), UVA e UVC, alternando entre luz ligada (ON) e desligada (OFF).

O Nb_2O_5 puro apresentou fotocorrentes baixas, enquanto o material dopado com 10% de níquel ($\text{Nb}_2\text{O}_5/10\%\text{Ni}$) exibiu fotocorrentes significativamente mais altas, especialmente sob luz UVA e UVC. A fotocorrente no estado escuro (OFF) foi praticamente nula em ambos os casos. A dopagem com Ni melhorou a resposta fotoeletroquímica, sugerindo maior eficiência nas reações fotoeletroquímicas.

A Figura 7 apresenta os gráficos de impedância de Nyquist para os materiais Nb_2O_5 (Figura a) e $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ni}$ (Figura b), obtidos a +1,35 V. As medições foram feitas sob diferentes condições de irradiação: luz visível (vermelho), UVA (azul) e UVC (verde), com a linha preta representando a condição de ausência de luz (OFF).

Para o material Nb_2O_5 puro (Figura a), a impedância diminuiu levemente sob irradiação visível, indicando uma redução na resistência interna do material. Já para a amostra dopada com 10% de níquel (Figura b), observa-se uma redução ainda mais significativa da impedância, especialmente sob luz UVA e UVC. Isso sugere que a dopagem com níquel melhora a condutividade do material, favorecendo a separação de cargas e, consequentemente, a eficiência fotoeletroquímica.

Figura - Gráficos de impedância de Nyquist a +1,35 V. (a) Nb_2O_5 , (b) $\text{Nb}_2\text{O}_5/10\%\text{Ni}$. Irradiação: (—) DESLIGADO, (—) visível (LED), (—) UVA, (—) UVC.

Conclusão

A heteroestrutura Nb₂O₅/Ni foi sintetizada com sucesso e apresentou melhorias significativas em suas propriedades fotoeletroquímicas em comparação ao Nb₂O₅ puro. A dopagem com níquel aumentou a eficiência na separação de cargas e reduziu a impedância interna, resultando em fotocorrentes mais altas, especialmente sob radiação UVA e UVC. Esses resultados destacam o Nb₂O₅/Ni como um material promissor para aplicações em fotoeletrocatalise.

Referências

- [1] B. Bakan, N. Bernet, T. Bouchez, R. Bourtou, JM Chouber, P. Dabert, C. Duquennoi, V. Ferraro, D. Garcia-Bernet, S. Gillot, Resíduos Orgânicos e Águas Residuais: Desafios de Pesquisa. *Wast and Biomass Valorization*, Hall 13 (2022) 1267-1267.
- [2] Desenvolvimento Sustentável: uma revisão e agenda de pesquisa, *International Journal of Productivity and Performance Management* 73 (2024) 497–522.
<https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2022-0314>.
- [3] W. Quilumbaquin, GX Castillo-Cabrera, LJ Borrero-González, JR Mora, V. Valle, A. Debut, LD Loor-Urgilés, PJ Espinoza-Montero, Degradação Fotoeletrocatalítica de Microplásticos de Polietileno de Alta Densidade em Ânodo Fotoeletroquímico Modificado com TiO₂, *IScience* 27 (2024) 109192. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2024.109192>.
- [4] P. M. Adamopoulos, I. Papagiannis, D. Raptis, P. Lianos, Produção Fotoeletrocatalítica de Hidrogênio Usando um Fotocatalisador Bilayer TiO₂/WO₃ na Presença de Etanol como Combustível, *Catalysts* 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/catal9120976>.
- [5] R. Umashankar, S. Harshitha Devi, K. Gurushantha, SO Manjunatha, M. Al-Dossari, G. Shobha, KJ Rudresh Kumar, MR Suresh Kumar, K. Keshavamurthy, NS Abd EL-Gawaad, A. Madhu, S. Satyanarayana Reddy, N. Srinatha, Propriedades Melhoradas Fotoeletroquímicas, Antimicrobianas e Fotocatalíticas de Nanopartículas de ZnO Nanocristalino Dopadas com Cu²⁺, *Ceram Int* 49 (2023) 22449–22459.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.077>.
- [6] A. Ziashahabi, M. Prato, Z. Dang, R. Poursalehi, N. Naseri, O Efeito da Oxidação de Prata na Atividade Fotocatalítica das Estruturas Híbridas Plasmônicas / Óxido de Metal Ag/ZnO sob Luz Visível e no Escuro, *Sci Rep* 9 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48075-7>.
- [7] K. Daideche, H. Lahmar, D. Lerari, A. Azizi, Influência do Potencial de Deposição no Crescimento Eletroquímico e Desempenho de Fotocatálise das Nanoestruturas de SnO₂, *Inorg Chem Commun* 147 (2023) 110154. <https://doi.org/10.1016/J.INOCHE.2022.110154>.
- [8] P. Alulema-Pullupaxi, PJ Espinoza-Montero, C. Sigcha-Pallo, R. Vargas, L. Fernández, JM Peralta-Hernández, JL Paz, Fundamentos e Aplicações da Fotoeletrocatalis*, como um processo eficiente para remover poluentes da água: Uma revisão, *Chemosphere* 281 (2021) 130821. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130821>.

Anexos

Figura 1 – Ilustração esquemática da obtenção do T-Nb₂O₅ e Nb₂O₅:Ni10% seguindo a rota de pechini.

Figura 2 – Etapas sequenciais do revestimento por imersão (dip-coating).

Figura 3 – Esquema do sistema para os estudos fotoeletroquímicos composto pela (1) célula fotoeletrocatalítica, (2) contra eletrodo de titânio, (3) eletrodo de referência de Ag/AgCl, (4) eletrodo de trabalho, (5) janela de quartzo, (6) eletrólito, (7) lâm

Figura 4 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (a) Nb₂O₅, (b) Nb₂O₅/Ni

Figura 5 - Espectroscopia por dispersão de energia (EDS) (a) Nb₂O₅, (b) Nb₂O₅//10%Ni

Figura 7- Gráficos de impedância de Nyquist a +1,35 V. (a) Nb₂O₅/, (b) Nb₂O₅//10%Ni.
Irradiação: (—) DESLIGADO, (—) visível (LED), (—) UVA, (—) UVC.

Figura 7 - Gráficos de impedância de Nyquist a +1,35 V. (a) Nb₂O₅/, (b) Nb₂O₅//10%Ni.
Irradiação: (—) DESLIGADO, (—) visível (LED), (—) UVA, (—) UVC.

CÓDIGO: ET1410

AUTOR: MATEUS DA SILVA LEMOS

ORIENTADOR: ZULMARA VIRGINIA DE CARVALHO

TÍTULO: Materiais Avançados e Manufatura Aditiva na Indústria de Defesa: Desafios Tecnológicos e Estratégicos

Resumo

O estudo analisa as tendências em materiais avançados e manufatura aditiva na indústria de defesa, buscando identificar desafios e oportunidades para o Brasil. A pesquisa, de caráter quantitativo, baseou-se em patentes da base Espacenet ligadas às tecnologias da Indústria 4.0, classificadas e organizadas em gráficos e análises específicas do cenário nacional. Os resultados apontam destaque para a fabricação aditiva de metais e compósitos, com ênfase em técnicas como Powder Bed Fusion (PBF) e Directed Energy Deposition (DED). As principais aplicações envolvem componentes aeronáuticos, armaduras balísticas, peças de mísseis e protótipos sob demanda. Observou-se crescimento das patentes até 2017, seguido por queda atribuída à maturação tecnológica e fatores macroeconômicos. China, EUA e Europa lideram em proteção de invenções, enquanto no Brasil predominam depósitos de multinacionais e instituições de pesquisa. O estudo ressalta estratégias de inserção tecnológica para ampliar a autonomia nacional e destaca a tendência ao desenvolvimento de soluções complexas e personalizadas, alinhadas à Indústria 4.0. Perspectivas futuras incluem avanços em nanocompósitos, cerâmicas funcionais e arquiteturas topológicas. Por fim, evidencia a relevância de políticas públicas e parcerias estratégicas para estimular a inovação e posicionar o Brasil nas cadeias globais de defesa.

Palavras-chave: Materiais Avançados, Manufatura Aditiva, Indústria da Defesa, Patentes

TITLE: Advanced Materials and Additive Manufacturing in the Defense Industry:
Technological and Strategic Challenges

Abstract

The study analyzes trends in advanced materials and additive manufacturing in the defense industry, seeking to identify challenges and opportunities for Brazil. The quantitative research was based on patents from the Espacenet database related to Industry 4.0 technologies, classified and organized into graphs and specific analyses of the national scenario. The results highlight the additive manufacturing of metals and composites, with an emphasis on techniques such as Powder Bed Fusion (PBF) and Directed Energy Deposition (DED). The main applications include aeronautical components, ballistic armor, missile parts, and on-demand prototypes. Patent growth was observed until 2017, followed by a decline attributed to technological maturation and macroeconomic factors. China, the US, and Europe lead in invention protection, while in Brazil, multinational corporations and research institutions predominate. The study highlights technological integration strategies to expand national autonomy and highlights the trend toward developing complex and customized

solutions aligned with Industry 4.0. Future prospects include advances in nanocomposites, functional ceramics, and topological architectures. Finally, it highlights the importance of public policies and strategic partnerships to stimulate innovation and position Brazil in global defense chains.

Keywords: Advanced Materials, Additive Manufacturing, Defense Industry, Patents

Introdução

A trajetória dos materiais avançados e da manufatura aditiva acompanha as Revoluções Industriais, marcadas por transformações profundas nos processos produtivos: da mecanização no século XVIII, à eletrificação no XIX, passando pela automação e produção em massa no XX, até a digitalização e integração ciberfísica no XXI. Esse percurso se conecta aos Ciclos de Kondratiev, que associam inovações disruptivas a ondas de crescimento econômico, mostrando como tecnologias emergentes impulsionam competitividade industrial (Schwab, 2016; Freeman; Louçã, 2001). Nesse contexto, a manufatura aditiva e os materiais avançados consolidam-se como pilares da Indústria 4.0, trazendo benefícios como produção de geometrias complexas, personalização, redução de desperdícios e flexibilidade, atributos cruciais para setores estratégicos como o de defesa (ABDI, 2017).

O mercado global de manufatura aditiva e materiais avançados tem crescimento acelerado. Em 2023, movimentou US\$ 19,14 bilhões, com projeção de alcançar US\$ 94,06 bilhões até 2032, a um CAGR de 19,1% (Business Research Insights, 2024). No setor aeroespacial e de defesa, o valor foi de US\$ 3,73 bilhões em 2021, com expectativa de atingir US\$ 13,01 bilhões em 2028 (CAGR de 19,5%) (Fortune Business Insights, 2024). No Brasil, a Base Industrial de Defesa (BID) gera mais de 220 mil empregos diretos e indiretos e contribui com exportações expressivas, fortalecendo a soberania e o desenvolvimento tecnológico nacional (MCTI, 2020; MD, 2022).

A incorporação da manufatura aditiva à defesa brasileira representa, portanto, oportunidade tecnológica e estratégica: amplia a autonomia produtiva, favorece a inserção em cadeias globais de valor e fortalece a capacidade de inovação. No âmbito da Indústria 4.0, esses avanços reduzem custos, aceleram ciclos produtivos e promovem integração civil-militar, desde que apoiados por políticas públicas eficazes e investimentos em P&D (IEDI, 2018; ABDI, 2017).

Assim, a pesquisa parte da questão: quais macro-tendências tecnológicas orientam as oportunidades empreendedoras em materiais avançados e manufatura aditiva na defesa?. Sua relevância está em compreender o papel estratégico dessas tecnologias para modernizar a defesa brasileira, reforçar a soberania e a autonomia, ampliar a competitividade internacional e gerar inovação.

O objetivo geral é mapear tendências tecnológicas associadas a materiais avançados e manufatura aditiva na defesa, a partir da análise de patentes. Especificamente, busca-se identificar quais tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 concentram mais invenções; mapear aplicações descritas; analisar o comportamento temporal das publicações; verificar países líderes em proteção; identificar inventores e depositantes; e compreender estratégias de inserção no mercado brasileiro.

Dessa forma, espera-se oferecer subsídios para políticas públicas, estimular a cooperação entre universidades, centros de pesquisa e a BID, favorecer a criação de empregos qualificados, fortalecer polos tecnológicos e ampliar a presença do Brasil nas cadeias globais de inovação em defesa.

Metodologia

Este estudo adota uma abordagem quantitativa, com foco em mapear as macro tendências tecnológicas associadas aos materiais avançados e o paradigma 4.0 na indústria de defesa, com foco na tecnologia de Impressão 3D, utilizando como base a análise de documentos de patentes. Trata-se de uma pesquisa aplicada, cujo objetivo está em identificar oportunidades tecnológicas e orientar estratégias nacionais que fortaleçam a capacidade do Brasil em enfrentar os desafios tecnológicos e estratégicos do setor.

A coleta de dados foi realizada por meio de uma prospecção patentária na base internacional Espacenet, mantida pelo European Patent Office (EPO), reconhecida como uma das principais fontes de informação tecnológica mundial. A busca foi conduzida durante o mês de agosto de 2025, utilizando a seguinte string de pesquisa, conforme descrito na Tabela 1.:
(("advanced materials" OR "high-performance materials" OR "functional materials" OR "lightweight materials" OR "composite materials" OR "metal alloys" OR "ceramic materials") AND ("defense industry" OR "military applications" OR "defense technology" OR "aerospace defense" OR "military manufacturing" OR "defense logistics")).

Esse conjunto de termos foi estruturado para maximizar a recuperação de documentos relacionados ao objeto de pesquisa, com foco na tecnologia habilitadora de manufatura aditiva da Indústria 4.0.

O período analisado abrange o intervalo de tempo de 2000 a 2024, com o objetivo de estudar a evolução das invenções ao longo das últimas décadas, contemplando o avanço da Quarta Revolução Industrial e sua influência sobre o desenvolvimento de materiais avançados e de tecnologias de manufatura aditiva aplicadas à indústria de defesa.

O procedimento metodológico empregado na pesquisa, apresentado na Tabela 1, foi estruturado em seis etapas centrais. A primeira consistiu na definição da string de busca, elaborada a partir da combinação de termos vinculados ao tema em análise. Na sequência, realizou-se a coleta dos dados, com a extração de documentos de patentes na base Espacenet, incluindo informações bibliográficas, país de depósito, inventores, requerentes e classificações tecnológicas de acordo com a International Patent Classification (IPC).

Na etapa seguinte, procedeu-se ao tratamento e à organização dos dados em planilha eletrônica, segmentando as informações segundo campos de aplicação, países, tecnologias habilitadoras e atores institucionais. Em seguida, foi conduzida a análise quantitativa, com a elaboração de gráficos descritivos por meio de ferramentas estatísticas (Excel), considerando variáveis como evolução temporal, distribuição geográfica, inventores, instituições envolvidas, principais tecnologias e áreas de aplicação. Posteriormente, realizou-se a classificação tecnológica das patentes, categorizando-as de acordo com as classes internacionais (IPC) e com a tecnologia habilitadora estudada, manufatura aditiva, conforme a tipologia estabelecida pela World Intellectual Property Indicators (WIPO). Finalmente, desenvolveu-se uma análise direcionada ao contexto brasileiro, mediante levantamento

complementar no sistema de busca do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), com o objetivo de identificar a presença e o comportamento dos principais atores no cenário nacional.

Além das análises descritivas, foi realizada uma revisão de fontes científicas e da literatura existente sobre o tema, com o objetivo de aprimorar a interpretação dos dados obtidos e identificar lacunas tecnológicas, oportunidades de desenvolvimento e tendências emergentes relacionadas ao objeto de estudo.

Resultados e Discussões

3. Resultados e Discussão

3.1 Evolução Temporal das Invenções

3.1.1 Panorama geral: volume anual de depósitos e publicações

A primeira patente de Materiais Avançados na Indústria de Defesa foi concedida no ano de 1959 marcando o início da proteção formal desse tipo de inovação, na já consolidada área de segurança nacional e avanço tecnológico militar.

O gráfico 1 revela uma trajetória de inovação caracterizada por um crescimento contínuo do ano 2000 até um pico em 2017, seguido por um declínio. O aumento inicial pode ser explicado por um aumento no investimento em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), impulsionado por políticas de incentivo e pela globalização, conforme discutido na literatura de Porter (1990). O pico de 2017, por sua vez, pode ser associado a um ciclo de inovação tecnológica, como a ascensão de novas áreas do conhecimento e estratégias de diferenciação empresarial em resposta a crises econômicas, como a de 2008, o que está em consonância com as teorias de Freeman (1982).

A queda no registro de patentes após 2017 e, em especial, a partir de 2020, pode ser atribuída à maturação de certas tecnologias e, principalmente, a eventos macroeconômicos e geopolíticos globais. Fatores como a desaceleração econômica e as incertezas causadas pela pandemia de COVID-19, que impactaram o investimento em P&D em diversos setores, são fundamentais para explicar essa tendência de baixa, como apontado em relatórios da WIPO (2023). A flutuação observada no gráfico, portanto, reflete a sensibilidade da atividade de patentes às condições econômicas e ao dinamismo do ciclo de inovação tecnológica global.

3.1.2 Recorte 4.0: inserção e distribuição temporal das tecnologias habilitadoras da Quarta Revolução Industrial

A prospecção patentária de Materiais Avançados e Manufatura Aditiva na Indústria de Defesa, utilizando o termo de busca ("advanced materials" OR "high-performance materials" OR "functional materials" OR "lightweight materials" OR "composite materials" OR "metal alloys" OR "ceramic materials") AND ("defense industry" OR "military applications" OR "defense technology" OR "aerospace defense" OR "military manufacturing" OR "defense logistics") encontrou 6508 patentes.

3.1.2.1. Soluções com uso de Impressão 3D

A Impressão 3D, ou Manufatura Aditiva (AM), é uma tecnologia de fabricação que cria objetos 3D pela adição de camadas de materiais, diferentemente da usinagem convencional. Ela permite a produção de peças complexas e personalizadas, com menor desperdício e a utilização de diversos materiais (Gibson; Rosen; Stucker, 2021). Na indústria de defesa, a combinação de manufatura aditiva e materiais avançados é estratégica. Ela possibilita a criação de peças leves e customizadas para uso militar, garantindo maior eficiência logística, fabricação sob demanda e inovação em campo. A pesquisa em novos materiais para AM, como superligas e compósitos, fortalece o desenvolvimento de soluções de alta performance para a segurança nacional (Gokulan; Subramanian, 2020).

O gráfico 2 evidencia a evolução do uso da manufatura aditiva ao longo das últimas duas décadas na área de materiais avançados aplicados à indústria da defesa. Nota-se uma estabilidade quase nula até o início de 2010, seguida por um crescimento acelerado e contínuo, com picos mais expressivos após 2015 e próximo a 2020.

O gráfico 2 evidencia a evolução do interesse e da aplicação da manufatura aditiva ao longo dos últimos anos, particularmente em setores estratégicos como a indústria de defesa. Observa-se que, entre os anos 2000 e 2010, os registros permanecem praticamente estáveis e baixos, o que pode ser explicado pelo estágio ainda inicial das tecnologias de impressão 3D, restritas a prototipagem e pesquisa acadêmica na área de materiais avançados (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). A partir de 2012, verifica-se uma tendência de crescimento mais acentuada, refletindo avanços significativos na disponibilidade de equipamentos, redução de custos e desenvolvimento de materiais avançados compatíveis com processos aditivos (Della Rosa; Camargo; Pereira, 2017).

Esse crescimento torna-se ainda mais expressivo a partir de 2015, quando a curva apresenta aumentos consistentes, alcançando picos próximos a 2020. Tal movimento está diretamente relacionado à consolidação da manufatura aditiva como uma tecnologia viável para produção de peças finais, sobretudo no setor militar, onde a demanda por componentes leves, resistentes e customizáveis é crítica (Huang et al., 2015). A presença de oscilações após 2020 indica tanto a expansão contínua da área quanto às flutuações relacionadas a fatores externos, como cadeias de suprimentos globais e desafios técnicos para a plena integração da tecnologia.

3.2 Aplicações Tecnológicas

3.2.1 Panorama geral: principais campos de aplicação e classificações internacionais

No setor de defesa, o gráfico 3 demonstra que as inovações em materiais avançados se concentram em três áreas principais: cerâmicas, compósitos e ligas metálicas. A predominância de patentes em cerâmicas (C04B35) e, em menor escala, em compósitos poliméricos (C08K3) e ligas especiais (C22C1), revela a busca por materiais que ofereçam alta resistência e leveza. Além disso, as categorias relacionadas a baterias e dispositivos eletroquímicos (H01M4, H01M10) indicam um foco crescente em tecnologias para a gestão e aprimoramento da autonomia energética de equipamentos militares.

O gráfico 3 mostra que as inovações em materiais avançados para a defesa se concentram em cerâmicas, polímeros e ligas metálicas especiais. A classificação C04B35, que abrange

materiais cerâmicos, lidera com mais de 700 patentes, evidenciando sua importância em blindagens e componentes militares devido à alta resistência (Rao; Hao; Yin, 2017).

Em segundo lugar, a categoria C08K3, referente a composições poliméricas, destaca a busca por materiais leves e de alto desempenho para veículos e sistemas aeroespaciais (Franzoni; Lopes; Reis, 2022). O gráfico também aponta para inovações em ligas metálicas especiais e compósitos híbridos (C22C1 e C08K7) (Gebhardt, 2016), bem como em tecnologias de energia, como eletrodos e células eletroquímicas (H01M4 e H01M10), essenciais para equipamentos militares modernos (Mahmoud; Chen; Zhou, 2022).

3.2.1.1. Aplicação C04B35

Foram encontrados 732 registros de patentes na área de materiais avançados para defesa, com destaque para a classificação C04B35, que trata de cerâmicas. Esses materiais são cruciais para a defesa devido à sua alta resistência mecânica, térmica e química, sendo usados em blindagens balísticas e revestimentos de motores (Boccaccini; Braun, 2001). Eles também são empregados em veículos militares e aeroespaciais, onde a combinação de baixo peso e alta resistência é essencial (Rittel; Mahameed, 2007).

Embora o uso de Impressão 3D nessa área ainda seja incipiente, com apenas 19 patentes na classe C04B35, a tecnologia é considerada um complemento promissor. A Impressão 3D permite a fabricação de componentes cerâmicos complexos com menos desperdício e maior flexibilidade, o que é estratégico para a produção de peças customizadas para drones, sensores e proteção balística (Zhou et al., 2020).

3.2.1.2. Aplicação C08K3

A amostra analisada revelou 370 registros com a classificação C08K3, que abrange o uso de substâncias inorgânicas como aditivos em polímeros. Esses materiais são de grande importância na indústria da defesa, pois permitem a criação de polímeros avançados para blindagens leves, coletes balísticos, componentes de aeronaves e sistemas de camuflagem (Costa et al., 2020).

Apesar de seu potencial, o uso da Impressão 3D nesta aplicação é limitado, com apenas seis patentes registradas na classe C08K3. A tecnologia é vista como um complemento promissor, pois possibilita a fabricação de polímeros aditivados com geometrias complexas. Essa integração é estratégica para a defesa, permitindo a produção de componentes personalizados para drones e blindagens adaptativas (Tumilty et al., 2023).

3.2.1.3. Aplicação C22C1

Na amostra investigada, foram encontrados 303 registros com a classificação C22C1, referente a ligas ferrosas (Callister; Rethwisch, 2021). Essas ligas são amplamente utilizadas na indústria da defesa em blindagens, veículos militares e componentes aeroespaciais, onde a relação entre resistência e peso é crucial. O uso da Impressão 3D, embora promissor, ainda é limitado, sendo representado por 33 patentes. Apesar disso, essa tecnologia se destaca como a que possui o maior número de registros na classe C22C1, pois permite a criação de componentes com geometrias otimizadas e menor desperdício de material. A manufatura aditiva de ligas metálicas, que está em fase de consolidação, já demonstra vantagens significativas em técnicas como o Selective Laser Melting (SLM) e o Directed Energy Deposition (DED) para aplicações críticas na defesa e aeroespacial (Dey et al., 2021).

3.2.2 Recorte 4.0: aplicações específicas associadas às tecnologias 4.0

O gráfico 4 evidencia a distribuição da manufatura aditiva em diferentes classificações patentárias vinculadas à área de materiais avançados para a indústria da defesa. Nota-se que a maior concentração ocorre na classe B22F3, relacionada à produção de peças a partir de pós metálicos, seguida por C22C1 e B29C70, que abrangem ligas ferrosas e polímeros, respectivamente. Em contrapartida, observa-se também a presença de tecnologias emergentes, como C04B35 (cerâmicas) e classes ligadas a compósitos e materiais estratificados (B32B27; B32B5), sinalizando o avanço para soluções mais sofisticadas.

A manufatura aditiva na indústria de defesa se concentra em algumas classificações de patentes. A classe B22F3, com 39 patentes, é a mais expressiva, destacando o uso de metais para a criação de componentes de alta resistência. Em seguida, a C22C1 (33 patentes) foca em ligas ferrosas para blindagens e peças de aeronaves, enquanto a B29C70 (29 patentes) trata de polímeros para soluções leves e versáteis, como drones e dispositivos portáteis.

O texto também menciona o uso de cerâmicas avançadas na classe C04B35 (19 patentes) e de compósitos nas classes B32B27 (15 patentes) e B32B5 (9 patentes), que são essenciais para reduzir o peso dos materiais sem sacrificar a resistência. Além disso, há patentes relacionadas à química de polímeros e aditivos, como C08J5, C08K3, C08K7 e C08K9, que buscam aprimorar as propriedades dos materiais. Por fim, as classificações H01M4 e H01M10 indicam um interesse inicial em soluções de armazenamento de energia.

Esses dados mostram que, embora a impressão 3D esteja mais consolidada em metais e polímeros, há uma crescente diversificação para outros materiais, como compósitos e cerâmicas, impulsionada pela busca por inovação e desempenho na indústria de defesa.

3.3 Distribuição Geográfica das Patentes

3.3.1 Panorama geral: países mais frequentes no depósito de patentes

O gráfico 5 evidencia a concentração de patentes em manufatura aditiva aplicada a materiais avançados para a defesa, com destaque para a China, que lidera amplamente, seguida por Estados Unidos e Europa. O Brasil aparece de forma discreta, refletindo limitações em inovação e transferência tecnológica no setor.

O Gráfico 5 apresenta a distribuição do número de patentes relacionadas à manufatura aditiva aplicada a materiais avançados na indústria da defesa, evidenciando o protagonismo da China (CN), que lidera de forma expressiva com quase 5.000 registros, seguida pelos Estados Unidos (US) e pelo agrupamento internacional de patentes (WO). Em seguida, aparecem a Europa (EP), Japão (JP), Coreia do Sul (KR) e Canadá (CA), consolidando-se como importantes centros de inovação tecnológica nesse setor estratégico.

Ao observarmos o desempenho do Brasil (BR), nota-se sua presença ainda tímida em comparação com os líderes globais, com um número significativamente menor de depósitos. Esse cenário pode ser explicado por fatores estruturais, como a menor tradição em investimentos contínuos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D&I) no setor de defesa, somado à dependência tecnológica externa em áreas de alta complexidade (Mendes; Silva, 2020). Além disso, a produção científica brasileira, embora crescente em

nanotecnologia e novos materiais, ainda encontra dificuldades na transferência de tecnologia para registros patentários, o que reflete diretamente no baixo desempenho em indicadores de propriedade intelectual (Costa et al., 2021).

3.3.2 Recorte 4.0: estratégias de proteção internacional nas tecnologias 4.0

O Gráfico 6 evidencia a concentração de patentes de impressão 3D em materiais avançados para a defesa, destacando-se a NAT UNIV como principal requerente, muito acima das demais instituições. Esse padrão demonstra o protagonismo acadêmico no avanço da manufatura aditiva, com esforços complementares de universidades e empresas em menor escala.

O gráfico 6 mostra que a China lidera, com mais de 200 patentes, a distribuição de registros relacionados à manufatura aditiva para materiais avançados aplicados à defesa, refletindo sua política de inovação estratégica. Os Estados Unidos e as organizações internacionais (WO) também se destacam, seguidos pela Europa (EP). Japão, Canadá, Austrália e Coreia do Sul têm participação intermediária, enquanto Espanha e Israel demonstram um envolvimento marginal.

Essa concentração de inovação em poucos polos globais confirma a importância da tecnologia para a corrida militar (Kapoor et al., 2021). A impressão 3D se consolida como uma ferramenta crucial para manutenção em campo, produção sob demanda e desenvolvimento de protótipos militares (Li; Wang; Zhang, 2020).

3.4 Principais players patentários

3.4.1 Principais organizações depositantes e sua nacionalidade

O Gráfico 7 evidencia a concentração de patentes em materiais avançados para a defesa, destacando o protagonismo das universidades nacionais, especialmente a NAT UNIV, que lidera com larga vantagem. Observa-se também a presença de outras instituições acadêmicas e algumas empresas, ainda em menor escala, refletindo a centralidade da academia no desenvolvimento científico e a participação crescente do setor privado nesse campo estratégico.

O gráfico 7 mostra que as patentes de materiais avançados para a defesa se concentram em instituições de ensino e pesquisa. Universidades nacionais (NAT UNIV), com mais de 500 patentes, lideram o desenvolvimento tecnológico, seguidas por outra instituição da mesma rede (NAT UNIV), com cerca de 250 registros.

A China também se destaca com instituições como PEOPLE'S, NAT UNIV DONG e UNIV SHANGHAI. Empresas como FUJIFILM CORP e OSTERHOUT também aparecem, indicando uma crescente participação do setor privado no desenvolvimento de tecnologias de uso dual (Dagnino, 2019). Essa dinâmica reflete a colaboração entre academia, governo e indústria, onde as universidades lideram a pesquisa e as empresas adaptam as inovações para uso militar e comercial.

3.4.2 Requerentes líderes em tecnologias 4.0 e sua atuação estratégica

O Gráfico 8 evidencia a concentração de patentes de impressão 3D em materiais avançados para a defesa, destacando-se a NAT UNIV como principal requerente, muito acima das demais instituições. Esse padrão demonstra o protagonismo acadêmico no avanço da manufatura aditiva, com esforços complementares de universidades e empresas em menor escala.

O gráfico 8 mostra que a NAT UNIV lidera a área de patentes de impressão 3D em materiais avançados para a defesa. A grande concentração de registros nessa instituição indica que as universidades nacionais são o principal motor da inovação tecnológica em setores estratégicos. Outras instituições, como People's University e UNIV Shanghai, têm participação menor.

Essa concentração em poucas universidades sugere que o avanço da impressão 3D na defesa está ligado a polos de excelência acadêmica. A literatura reforça que a aplicação da manufatura aditiva exige altos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, que são mais acessíveis em centros universitários e institutos estatais (Gibson; Rosen; Stucker, 2021). A predominância acadêmica também ressalta a importância da colaboração entre universidades e indústrias para acelerar a aplicação prática de materiais avançados em sistemas de defesa (George; Li; Cestello, 2020).

3.4.3 Dinâmica dos Players Patentários no Território Brasileiro

A participação do Brasil na área de patentes de materiais avançados para a defesa é incipiente, com apenas uma patente registrada pela Fujifilm. Isso demonstra a baixa produção tecnológica do país e sua forte dependência de inovações externas, vindas de polos como China, Estados Unidos e União Europeia. Embora o Brasil tenha potencial científico e centros de pesquisa, ele ainda não conseguiu transformar esse conhecimento em propriedade intelectual para o setor de defesa.

Esse cenário destaca a necessidade de políticas públicas que incentivem a inovação, a transferência de tecnologia e o fortalecimento da indústria nacional, para que o Brasil possa gerar valor e negócios com suas próprias inovações (Gonçalves et al., 2020; Silva; Moraes; Borges, 2022).

Conclusão

As análises desta pesquisa indicam que a tecnologia habilitador 4.0 de Impressão 3D é relacionada a materiais avançados está cada vez mais presente na inovação do setor de defesa, com destaque para processos de fabricação de metais e compósitos. Essas tendências sinalizam uma forte direção para a produção de componentes mais leves, resistentes e sob demanda, ampliando a autonomia tecnológica do Brasil e sua competitividade internacional.

Os principais achados revelam uma concentração de patentes por agentes internacionais, especialmente da China, Estados Unidos e Europa, com participação crescente de centros de pesquisa e empresas no Brasil. A implementação das tecnologias 4.0, embora vital para a modernização, enfrenta desafios relacionados à normatização, qualificação de profissionais e custos elevados, o que limita sua adoção plena no cenário nacional.

Diante desses fatores, o estudo fornece subsídios importantes para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias de inovação no setor de defesa. No entanto, as limitações quanto à abrangência das fontes e à análise de aspectos qualitativos destacam a necessidade de investimentos futuros em estudos mais detalhados, incluindo cenários específicos, obstáculos regulatórios e a inserção de atores nacionais nas cadeias globais de inovação tecnológica.

Referências

ABDI. Indústria 4.0 pode economizar R\$ 73 bilhões ao ano para o Brasil. Brasília: ABDI, 2017. Disponível em: <https://www.abdi.com.br/industria-4-0-pode-economizar-r-73-bilhoes-ao-ano-para-o-brasil/>. Acesso em: 31 ago. 2025.

BOCCACCINI, Aldo R.; BRAUN, Wolfgang. Ceramic matrix composites: routes and properties. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 21, n. 10–11, p. 1999–2006, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(01\)00132-9](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00132-9). Acesso em: 11 ago. 2025.

BUSINESS RESEARCH INSIGHTS. Additive Manufacturing Materials Market Report 2024-2032. 2024. Disponível em: <https://www.businessresearchinsights.com/pt/market-reports/additive-manufacturing-materials-market-102050>. Acesso em: 01 ago. 2025.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10. ed. New Jersey: Wiley, 2021. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Materials+Science+and+Engineering%3A+An+Introduction%2C+10th+Edition-p-9781119405498>. Acesso em: 13 ago. 2025.

COSTA, D. S.; PEREIRA, M. A.; OLIVEIRA, T. C. Nanotecnologia e indústria de defesa no Brasil: avanços e desafios. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 38, n. 1, p. 1-22, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2021.v38.27213>. Acesso em: 17 ago. 2025.

COSTA, M. F. et al. Polímeros avançados na defesa: perspectivas e aplicações em sistemas de proteção. *Revista Matéria*, v. 25, n. 2, e-12545, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.12545>. Acesso em: 13 ago. 2025.

DAGNINO, Renato. *Ciência, tecnologia e inovação para a defesa: uma abordagem crítica*. Campinas: Editora da Unicamp, 2019. Disponível em: <https://www.editoraunicamp.com.br/produto/ciencia-tecnologia-e-inovacao-para-a-defesa/>. Acesso em: 15 ago. 2025.

DELLA ROSA, Rubens; CAMARGO, Simone Gomes; PEREIRA, João Victor. Manufatura aditiva: uma revisão das tecnologias e aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 27, n. 4, p. 290–301, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.08116>. Acesso em: 09 ago. 2025.

DEY, A. et al. Additive manufacturing of steels for defense applications: Opportunities and challenges. *Progress in Materials Science*, v. 120, p. 100794, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100794>. Acesso em: 14 ago. 2025.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. *Aerospace & Defense Additive Manufacturing Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis*. 2024. Disponível

em:<https://www.fortunebusinessinsights.com/pt/aerospace-defense-additive-manufacturing-market-106550>. Acesso em: 01 ago. 2025.

FRANZONI, Gabriela; LOPES, Cíntia; REIS, Joaquim. Polymer matrix composites for advanced applications: a review. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 32, e2022021, 2022. DOI:<https://doi.org/10.1590/0104-1428.20220047>. Acesso em: 10 ago. 2025.

FREEMAN, C.; LOUÇÃ, F. *As Time Goes By: From the Industrial Revolutions to the Information Revolution*. Oxford: Oxford University Press, 2001.

FREEMAN, Christopher. *The Economics of Industrial Innovation*. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 1982.

GEBHARDT, Andreas. *Understanding additive manufacturing: rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing*. 2. ed. Munich: Hanser Publishers, 2016. DOI:<https://doi.org/10.3139/9783446445721>. Acesso em: 11 ago. 2025.

GEORGE, R.; LI, J.; CESTELLO, B. Additive manufacturing in defense: Opportunities and challenges. *Defense Technology*, v. 16, n. 4, p. 1233-1243, 2020. DOI: 10.1016/j.dt.2019.11.003.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2. ed. New York: Springer, 2015. Disponível em:<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>. Acesso em: 09 ago. 2025.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies*. 3. ed. Cham: Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7.

GOKULAN, K.; SUBRAMANIAN, K. Advanced materials for additive manufacturing in defense applications: A review. *Defence Technology*, v. 16, n. 4, p. 890-904, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.02.010>. Acesso em: 09 ago. 2025.

GONÇALVES, R. F. et al. Propriedade intelectual e inovação tecnológica: uma análise da inserção do Brasil em cadeias globais. *Revista de Administração e Inovação*, v. 17, n. 3, p. 189-204, 2020. Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.rai.2020.03.001>. Acesso em: 22 ago. 2025.

HUANG, Samuel H. et al. Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 137, n. 1, p. 014001, 2015. Disponível em:<https://doi.org/10.1115/1.4028725>. Acesso em: 10 ago. 2025.

IEDI. Políticas para o desenvolvimento da Indústria 4.0 no Brasil. 2018. Disponível em:https://iedi.org.br/media/site/artigos/20180710_politicas_para_o_desenvolvimento_da_industria_4_0_no_brasil.pdf. Acesso em: 02 ago. 2025.

KAPOOR, Amit et al. Additive manufacturing in defense: opportunities and challenges. *Defence Technology*, v. 17, n. 3, p. 738-750, 2021. Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.06.002>. Acesso em: 20 ago. 2025.

LI, Yong; WANG, Peng; ZHANG, Lei. Recent advances in additive manufacturing of high-performance materials for aerospace and defense. *Progress in Materials Science*, v. 113, p.

100673, 2020. Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100673>. Acesso em: 22 ago. 2025.

MAHMOUD, Doaa; CHEN, Rong; ZHOU, Wei. Additive manufacturing of energy storage devices: batteries and supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 10, n. 13, p. 6600–6628, 2022. DOI:<https://doi.org/10.1039/D1TA10612B>. Acesso em: 11 ago. 2025.

MCTI. Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2016–2022. Brasília: MCTI, 2020. Disponível

em:https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/transformacaodigital/arquivo-camara-industria/iniciativas/ci_nt_nicho_tec_nac.pdf. Acesso em: 02 ago. 2025.

MD. Base Industrial de Defesa: Relatório 2022. Brasília: MD, 2022. Disponível em:<https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/industria-de-defesa/base-industrial-de-defesa>. Acesso em: 02 ago. 2025.

MENDES, L. R.; SILVA, J. F. Inovação e autonomia tecnológica na defesa: desafios para o Brasil no século XXI. *Revista Brasileira de Estudos de Defesa*, v. 7, n. 2, p. 119-140, 2020. Disponível em:<https://doi.org/10.26792/rbed.v7n2.2020.840>. Acesso em: 17 ago. 2025.

PORTER, Michael E. *The Competitive Advantage of Nations*. New York: Free Press, 1990.

RAO, Akshay; HAO, Liang; YIN, Jun. Additive manufacturing of ceramics: a review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, v. 12, n. 3, p. 282–297, 2017.

DOI:<https://doi.org/10.1007/s11465-017-0458-8>. Acesso em: 10 ago. 2025.

RITTEL, Daniel; MAHAMEED, Hazem. Adiabatic shear failure and dynamic behavior of advanced ceramics. *International Journal of Impact Engineering*, v. 34, n. 5, p. 857–872, 2007. Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.05.002>. Acesso em: 12 ago. 2025.

SILVA, F. C.; MORAIS, J. M.; BORGES, A. C. Dinâmica da inovação em defesa: patentes, tecnologias emergentes e desafios para o Brasil. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 21, p. 1-25, 2022. Disponível em:<https://doi.org/10.20396/rbi.v21i0.8665697>. Acesso em: 23 ago. 2025.

TUMILTY, T. et al. Additive manufacturing of polymer composites for defense applications. *Additive Manufacturing*, v. 65, 103386, 2023. Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103386>. Acesso em: 13 ago. 2025.

WIPO. *World Intellectual Property Indicators*. Genebra, 2023. Disponível em:<https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo-pub-941-2023-en-world-intellectual-property-indicators-2023.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2025.

ZHOU, Z.; CHEN, Z.; ZHANG, W. Additive manufacturing of advanced ceramics: A review. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 103, n. 6, p. 3374-3399, 2020. Disponível em:<https://doi.org/10.1111/jace.17102>. Acesso em: 12 ago. 2025.

Anexos

Fonte: Elaboração dos Autores. Adaptado de Espacenet (2025)

Fonte: Elaboração dos Autores. Adaptado de Espacenet (2025)

Fonte: Elaboração dos Autores. Adaptado de Espacenet (2025)

Fonte: Elaboração dos Autores. Adaptado de Espacenet (2025)

Fonte: Elaboração dos Autores. Adaptado de Espacenet (2025)

Fonte: Elaboração dos Autores. Adaptado de Espacenet (2025)

Fonte: Elaboração dos Autores. Adaptado de Espacenet (2025)

Fonte: Elaboração dos Autores. Adaptado de Espacenet (2025)

Fonte: Elaboração dos Autores (2025).

CÓDIGO: ET1417

AUTOR: SAMUEL FERREIRA GOMES

COAUTOR: JOSE MARIO NOBREGA JALES DANTAS

COAUTOR: THALES WENDEL FERNANDES VIEIRA

COAUTOR: JOSÉ CARLOS GOMES DA SILVA

ORIENTADOR: RUMMENIGGE RUDSON DANTAS

TÍTULO: Tecnologia assistiva: machine learning e gamificação na reabilitação motora.

Resumo

A reabilitação física enfrenta frequentemente barreiras relacionadas à baixa motivação e adesão, sobretudo entre indivíduos com mobilidade reduzida. Nesse contexto, jogos sérios e soluções em realidade virtual (RV) surgem como estratégias promissoras, ao converter exercícios repetitivos em experiências interativas e motivadoras. Assim, apresentamos neste estudo preliminar uma plataforma que combina machine learning, realidade semi-imersiva e recuperação motora. Um jogo sério em RV que interpreta os movimentos do paciente em um modificadoergômetro de remo via aprendizado de máquina para produzir uma simulação semi-imersiva de navegação, integrando ritmos adaptativos e feedback em tempo real. Em um estudo preliminar, participantes saudáveis realizaram uma sessão estruturada de remo na plataforma, durante a qual foram monitorados o volume total de braçadas — flexo-extensão do joelho, a distância percorrida no jogo e variáveis por braçada, como duração e profundidade. A usabilidade foi aferida por meio do System Usability Scale (SUS), complementado por escalas de adjetivo, classificação e aceitabilidade. Os resultados evidenciaram alta usabilidade e melhorias significativas, ainda durante a sessão, no desempenho do exercício e na qualidade do movimento. Esses achados indicam que a plataforma pode conciliar engajamento e ganhos objetivos em intensidade, constituindo um passo inicial para futuros ensaios clínicos que avaliem seu potencial terapêutico e a adesão a longo prazo.

Palavras-chave: Machine learning, realidade virtual, reabilitação, jogos sérios.

TITLE: Assistive technology: machine learning and gamification in motor rehabilitation.

Abstract

Physical rehabilitation often faces barriers related to low motivation and adherence, particularly among individuals with reduced mobility. In this context, serious games and virtual reality (VR) solutions emerge as promising strategies by transforming repetitive exercises into interactive and engaging experiences. In this preliminary study, we present a platform that integrates machine learning, semi-immersive reality, and motor recovery. The system consists of a VR serious game that interprets patient movements on a modified rowing ergometer through machine learning, generating a semi-immersive navigation simulation

with adaptive pacing and real-time feedback. In a structured rowing session with healthy participants, we monitored total stroke volume — corresponding to knee flexion–extension — in-game distance, and per-stroke variables such as duration and depth. Usability was assessed using the System Usability Scale (SUS), complemented by adjective, grading, and acceptability scales. The results demonstrated high usability and significant within-session improvements in exercise performance and movement quality. These findings suggest that the platform can combine user engagement with measurable gains in exercise intensity, representing an initial step toward future clinical trials to evaluate its therapeutic potential and long-term adherence.

Keywords: Machine learning, virtual reality, rehabilitation, serious games.

Introdução

A reabilitação motora é essencial para a preservação e recuperação da funcionalidade em pessoas com mobilidade reduzida. Contudo, a fisioterapia convencional frequentemente se depara com baixas taxas de adesão, envolvimento reduzido e falta de motivação por parte dos pacientes, fatores que comprometem os resultados terapêuticos. Estima-se que cerca de 70% dos indivíduos não cumprem integralmente programas domiciliares ou não supervisionados, o que diminui a eficácia das intervenções e retarda a recuperação. Para mitigar essas limitações, tem aumentado o interesse pela integração de tecnologias, em especial a realidade virtual e os jogos sérios, aos programas de reabilitação. A RV permite a criação de ambientes tridimensionais interativos que transformam exercícios repetitivos em atividades mais atraentes e estimulantes, o que tende a melhorar a motivação e a experiência do usuário. Estudos e revisões apontam que a incorporação da RV à fisioterapia pode resultar em maior adesão e em ganhos funcionais relevantes, mesmo considerando desafios iniciais associados a custo e adaptação tecnológica. A gamificação complementa essa abordagem ao introduzir componentes lúdicos — metas, recompensas, níveis e feedback imediato — que sustentam o engajamento ao longo do tratamento. Evidências sistematizadas indicam que intervenções gamificadas frequentemente alcançam desfechos clínicos comparáveis ou superiores aos de protocolos tradicionais, além de reduzir a sensação de monotonia e aumentar a satisfação dos pacientes durante a prática terapêutica.

Dentre as modalidades aplicadas na reabilitação gamificada, os ergômetros de remo destacam-se por sua versatilidade. O remo oferece um exercício rítmico e de baixo impacto, facilmente ajustável às capacidades individuais. Tal versatilidade quando unida ao aprendizado de máquina e a uma webcam convencional, possibilita que o movimento executado pelo paciente seja interpretado, eficientemente, pelo modelo preditivo, gerando uma descrição do posicionamento das juntas do indivíduo. Essa descrição sendo a chave para identificar a execução do exercício e convertê-lo em interação gamificada, avaliar métricas de desempenho e, no geral, provocar imersão no ambiente virtual. Nesse quadro, descrevemos uma plataforma semi-imersiva para treino de membros inferiores que faz uso de um ergômetro de remo modificado e de um modelo de aprendizado de máquina capaz de determinar as articulações humanas para captar a flexo extensão de joelho feita pelo paciente no ergômetro e converter numa simulação interativa de navegação. A solução propõe que o usuário siga uma embarcação-referência em cadências variáveis, recebendo feedback de desempenho em tempo real e adaptações automáticas de dificuldade. Realizamos um estudo preliminar com estudantes universitários saudáveis para validar a operacionalidade e a usabilidade do sistema, e planejamos estender as avaliações a populações com mobilidade reduzida, condições crônicas e comprometimentos neurológicos,

com o objetivo de avaliar a eficácia terapêutica e a adesão a longo prazo. Este artigo descreve o projeto do sistema, detalha a avaliação preliminar e discute achados iniciais relacionados à cadência de exercício, usabilidade e engajamento do usuário.

Metodologia

A experiência semi-imersiva gamificada para treino de membros inferiores desenvolvida neste estudo foi estruturada em três componentes principais: movimento, interpretação e interação.

Movimento.

Foi empregado um ergômetro de remo modificado para possibilitar o treino específico de membros inferiores. Diferentemente do funcionamento convencional, em que o usuário traciona a corda de resistência, a adaptação permitiu que o exercício fosse realizado por meio da flexo-extensão de joelhos. A resistência foi gerada pelo próprio peso corporal do participante, ajustada pela inclinação do dispositivo. Para tanto, o ergômetro, originalmente horizontal, foi inclinado pela elevação da sua base posterior, utilizando calços, o que aumentou a porcentagem de peso corporal atuando contra o movimento. Fig. 1. Dessa forma, diferentes níveis de dificuldade motora puderam ser simulados de acordo com o ângulo de inclinação adotado.

Interpretação.

Para a captação do movimento, utilizou-se a câmera integrada de um notebook posicionado em suporte frontal ao ergômetro, garantindo visibilidade adequada tanto para o registro da flexo-extensão dos joelhos quanto para a visualização da interface gráfica pelo participante. O processamento do vídeo em tempo real foi realizado com o modelo de predição de poses MoveNet (Google), baseado em aprendizado de máquina. O modelo forneceu as coordenadas das articulações relevantes, permitindo identificar o movimento de flexo-extensão a partir das distâncias relativas entre quadris e joelhos. Essa abordagem, acessada via API web, viabilizou o funcionamento do sistema em dispositivos de baixo poder computacional.

Interação.

A camada de gamificação foi implementada em ambiente tridimensional desenvolvido com a API A-Frame, que proporcionou ao usuário uma experiência em primeira pessoa de simulação de navegação. Fig. 2. Após o acionamento do comando de início, o participante foi posicionado virtualmente em um barco, instruído a manter os membros inferiores em extensão na posição inicial e, em seguida, a realizar movimentos de flexo-extensão máxima possível, mantendo contato dos pés com a base e postura ereta. Cada execução válida resultou em um impulso virtual do barco em direção a uma embarcação de referência. A intensidade do impulso foi proporcional à profundidade relativa do movimento, calculada a partir da comparação entre a amplitude atual e a amplitude máxima registrada para o participante.

Avaliação Preliminar

Com o objetivo de avaliar a viabilidade, a eficácia do exercício e a usabilidade da plataforma semi-imersiva, foi conduzida uma avaliação preliminar com 20 participantes. Essa avaliação foi organizada em três fases: recrutamento, execução e avaliação.

Recrutamento

Vinte estudantes universitários foram convidados por meio de anúncios enviados por e-mail e

cartazes afixados no campus. Os critérios de inclusão exigiam que os voluntários fossem capazes de realizar movimentos de remo de forma segura e que não apresentassem déficits visuais, cognitivos ou vestibulares graves que pudessem comprometer o uso de realidade virtual. Antes da coleta de dados, todos os participantes assinaram termo de consentimento livre e esclarecido e passaram por uma triagem breve para confirmar a segurança no uso do ergômetro modificado. Foi garantido o direito de desistência a qualquer momento, sem penalidade, e informado que não seriam coletados dados pessoais sensíveis (Exemplo: orientação sexual, etnia, crença religiosa ou opinião política).

Execução

A execução consistiu em uma sessão única com duração total de 7,5 minutos. Inicialmente, os participantes realizaram um esforço máximo (e de máxima amplitude de flexo-extensão) por 30 segundos a 100% da cadência individual, seguido por sete minutos de exercício a percentuais variáveis desse valor. Nos 30 segundos iniciais, o sistema realizou uma fase de calibração automática para ajustar a cadência inicial do barco de referência à capacidade de cada participante. Durante o exercício, eram calculados e armazenados continuamente dados de desempenho como cadência (repetições por minuto), potência, profundidade da flexo-extensão e qualidade do movimento. Após os 30 segundos iniciais, durante os 7 min seguintes, uma corda inicial ligava o barco do participante ao de referência, indicando, por meio do quão tensionada ela estivesse, o quão bem está sendo feito o acompanhamento do ritmo do barco de referência. O rompimento da corda decorrente da impossibilidade de acompanhar o barco referência causaria no rompimento da corda (fig. 2) e, consequentemente, na parada do barco, dando a oportunidade do paciente alcançá-lo e tentar novamente. Todos os indicadores — número de repetições, duração e profundidade de cada movimento, qualidade e distância percorrida — foram registrados continuamente para análise minuto a minuto.

Avaliação

A análise da plataforma contemplou quatro etapas. Primeiro, foram quantificados o número total de movimentos executados (flexo-extensões) e a distância percorrida no ambiente virtual, com cálculo de média, desvio padrão, valores mínimo e máximo entre os participantes, representando o volume global de atividade. Segundo, para cada movimento individual, foram computadas estatísticas descritivas (média, desvio padrão, valores mínimo e máximo) de duração (em segundos) e profundidade normalizada (escala 0–1). Terceiro, para avaliar tendências temporais, aplicou-se regressão linear às séries de duração e profundidade de cada participante, de forma a identificar possíveis aumentos ou reduções sistemáticas ao longo da sessão. Por fim, imediatamente após a experiência, os participantes responderam ao System Usability Scale (SUS), composto por dez itens e que gera escore entre 0 e 100 (valores acima de 68 indicam usabilidade acima da média). Além disso, foi realizada uma breve entrevista semiestruturada para obter feedback qualitativo sobre percepção de esforço, aspectos motivacionais e sugestões de aprimoramento do sistema.

Resultados e Discussões

Resultados

e

Discussão

Nesta seção, avaliamos inicialmente a experiência do usuário com a plataforma por meio do System Usability Scale (SUS) e de retorno qualitativo, a fim de verificar se a interface é intuitiva e envolvente. Em seguida, analisamos os dados provenientes dos participantes

válidos ($SUS \geq 68$) para quantificar a carga de trabalho — número de braçadas e distância virtual — e examinar tendências por braçada quanto à duração e profundidade. Esses achados ilustram como a plataforma promove satisfação do usuário ao mesmo tempo em que gera ganhos de desempenho mensuráveis em uma única sessão.

Para avaliar a usabilidade geral da solução, submeteu-se os participantes ao questionário SUS, instrumento consolidado para aferir facilidade de uso e satisfação em sistemas interativos. A análise seguiu o System Usability Scale Analysis Toolkit de Blattgerste et al. [4]. Conforme referenciado por Brooke [5], escores acima de 68 são considerados acima da média. Conforme apresentado na Tabela 1, a plataforma obteve escore SUS de 78,88, confirmando a aceitação do sistema. Esse resultado indica que a interface e as mecânicas são percebidas como intuitivas, contribuindo positivamente para a experiência do usuário. A mediana igual a 77,5 e o desvio-padrão de 9,88 reforçam a consistência das percepções entre os participantes.

Para complementar a interpretação do SUS, foram aplicadas as escalas Adjective, Grade e Acceptability. A escala Adjective, baseada em estudos de Bangor et al. [1] e interpretação de [15], classifica a experiência entre “Pior Imaginável” e “Melhor Imaginável”; a plataforma foi categorizada como “Boa”, a terceira melhor das seis categorias possíveis. A Grade Scale de Sauro e Lewis [16], que converte escores SUS em notas de “F” a “A”, atribuiu à solução a nota A, equivalente a desempenho excelente. A escala de aceitabilidade [2] situou a plataforma dentro da faixa aceitável, corroborando os achados do SUS. Dois dos vinte participantes que obtiveram escore SUS inferior a 68 foram considerados inválidos para a análise de desempenho, resultando em 18 participantes válidos.

Análise das métricas de desempenho.

Considerando a sessão única de 7,5 minutos, caracterizamos inicialmente a carga de trabalho geral por meio do volume de atividade e da produção de trabalho virtual. Os participantes executaram em média $172,94 \pm 41,09$ braçadas (intervalo: 104–248), indicando variabilidade moderada no engajamento e no ritmo. A distância total média percorrida no ambiente virtual foi de $442,30 \pm 52,81$ m (intervalo: 326,50–517,58 m), o que sugere manutenção de um ritmo de propulsão relativamente vigoroso pela maioria dos usuários. Os desvios-padrão relativamente estreitos — aproximadamente 24% da média de braçadas e 12% da média de distância — indicam que, apesar de diferenças individuais, a sessão provocou trabalho mensurável de forma consistente.

A análise dinâmica por braçada revelou tendências temporais em velocidade e amplitude do movimento. As durações médias de braçada variaram de 1,19 a 3,40 s (média geral $\approx 2,20$ s; amplitude do desvio-padrão por participante: 0,14–2,12 s). A regressão linear aplicada à série temporal de durações por participante mostrou que 12 de 18 usuários apresentaram inclinações negativas (inclinação média $\approx -0,004$ s/braçada), indicando aceleração da cadência à medida que se adaptavam aos sinais de ritmo da plataforma. Os seis participantes restantes exibiram inclinações levemente positivas, possivelmente decorrentes de fadiga inicial ou de uma estratégia de ritmo mais conservadora.

Quanto à profundidade da braçada (escala normalizada 0–1), as médias variaram entre 0,30 e 0,62 (média geral $\approx 0,45$; desvio-padrão por participante: 0,02–0,08). A regressão temporal sobre as profundidades revelou que 12 de 18 participantes apresentaram pequenas inclinações positivas (inclinação média $\approx +0,00025$ por braçada), sugerindo aumento gradual da amplitude do movimento ao longo da sessão. Os seis participantes com inclinações negativas possivelmente experimentaram leve fadiga ou redução da amplitude de puxada ao progredir.

Esses padrões de profundidade são compatíveis com efeitos iniciais de aprendizagem motora, nos quais os usuários tendem a executar braçadas mais completas à medida que se familiarizam com a tarefa — indicador promissor de refinamento técnico mesmo em uma única execução.

Em conjunto, os resultados mostram que a plataforma não apenas induz produção física substancial em uma breve sessão, mas também promove melhorias mensuráveis em velocidade e profundidade das braçadas em tempo real, ressaltando seu potencial como ferramenta semiespacial, baseada em dados, para intervenção fisioterapêutica. A capacidade de adaptação imediata do sistema, associada ao ajuste automático de dificuldade com base no desempenho, evidencia potencial para personalização de programas de reabilitação.

Conclusão

Considerações Finais, Limitações e Trabalhos Futuros

Esta avaliação preliminar demonstra a viabilidade da plataforma semi-imersiva de navegação baseada em remo como jogo sério aplicável à fisioterapia. O escore SUS de 78,88 (mediana = 77,5; desvio-padrão = 9,88), somado a classificações “Boa” na escala Adjective, nota A na Grade Scale e enquadramento na faixa aceitável, confirma que os usuários julgaram a interface intuitiva e atraente. Ao excluir dois participantes com SUS < 68, garantiu-se que as análises de desempenho refletissem dados de 18 usuários que compreendiam e interagiam com o sistema de forma confiável.

Em termos de produção física, os participantes realizaram em média $172,9 \pm 41,1$ braçadas e percorreram $442,3 \pm 52,8$ m em uma única sessão de 7,5 minutos, evidenciando a capacidade da solução em gerar carga substancial mesmo em ensaio breve. As análises por braçada indicaram que 12 de 18 usuários aceleraram progressivamente a cadência (inclinação média $\approx -0,004$ s/braçada) e ampliaram a amplitude das braçadas (inclinação média $\approx +0,00025$ /braçada) ao longo da sessão, sugerindo aprendizagem motora rápida e aprimoramento técnico imediato. Esses ganhos intra-sessão validam os mecanismos de pace adaptativo e feedback em tempo real, que parecem motivar os usuários a otimizar velocidade e amplitude sem intervenção direta do terapeuta. A capacidade de ajuste automático de dificuldade e a disponibilidade de dados de desempenho detalhados posicionam a plataforma como ferramenta promissora para reabilitação personalizada.

Entretanto, algumas limitações devem ser ressaltadas. A amostra foi composta exclusivamente por estudantes saudáveis, o que restringe a generalização dos achados para populações clínicas. Estudos randomizados, de maior porte e incluindo indivíduos com mobilidade reduzida, condições musculoesqueléticas crônicas ou comprometimentos neurológicos, serão necessários para confirmar os resultados iniciais e confrontar a solução com protocolos de reabilitação convencionais. Pesquisas futuras deverão focar na validação clínica em pacientes pós-AVC, com lesão medular e em idosos, avaliando benefícios terapêuticos, desfechos funcionais e segurança em contextos reais; explorar modos de jogo aprimorados (p. ex., corridas competitivas e cooperativas) para explorar motivação social; implementar algoritmos de personalização e integrar sensores fisiológicos (frequência cardíaca, por exemplo); e investigar adesão a longo prazo em regimes domiciliares ou tele-reabilitação, mensurando retenção, frequência de exercício e ganhos funcionais ao longo do tempo. Ao superar essas limitações e ampliar o desenho experimental, pretende-se consolidar

a plataforma como ferramenta escalável e baseada em evidências para diversas populações de reabilitação diferentes.

Referências

1. Bangor, A., Kortum, P., Miller, J.: Determining what individual sus scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of usability studies* 4(3), 114–123 (2009)
2. Bangor, A., Kortum, P.T., Miller, J.T.: An empirical evaluation of the system usability scale. *Intl. Journal of Human–Computer Interaction* 24(6), 574–594 (2008)
3. Bhise, S., Azeem, Z., Dabadghav, R., Shiralkar, M.: Exploring virtual reality tools for balance rehabilitation in the elderly: A narrative review. *Bharati Vidyapeeth Medical Journal* 4(4), 43–52 (2024)
4. Blattgerste, J., Behrends, J., Pfeiffer, T.: A web-based analysis toolkit for the system usability scale. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. p. 237–246. PETRA '22, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (2022). <https://doi.org/10.1145/3529190.3529216>, <https://doi.org/10.1145/3529190.3529216>
5. Brooke, J., et al.: Sus-a quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry* 189(194), 4–7 (1996)
6. Brurok, B., Helgerud, J., Karlsen, T., Leivseth, G., Hoff, J.: Effect of aerobic high intensity hybrid training on stroke volume and peak oxygen consumption in men with spinal cord injury. *American journal of physical medicine & rehabilitation* 90(5), 407–414 (2011)
7. Ceradini, M., Losanno, E., Micera, S., Bandini, A., Orlandi, S.: Immersive vr for upper-extremity rehabilitation in patients with neurological disorders: A scoping review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 21(1), 75 (2024)
8. Damaševičius, R., Maskeliūnas, R., Blažauskas, T.: Serious games and gamification in healthcare: A meta-review. *Information* 14, 105 (02 2023). <https://doi.org/10.3390/info14020105>
9. Hansen, R.K., de Wit, J.L.J., Samani, A., Laessoe, U., Figlewski, K., Larsen, R.G.: Wheelchair-modified ergometer rowing exercise in individuals with spinal cord injury: A feasibility, acceptability, and preliminary efficacy study. *Spinal Cord Series and Cases* 8(1), 48 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41394-022-00518-6>
10. Jack, K., McLean, S.M., Moffett, J.K., Gardiner, E.: Barriers to treatment adherence in physiotherapy outpatient clinics: a systematic review. *Manual therapy* 15(3), 220–228 (2010)
11. Naqvi, W.M., Naqvi, I., Mishra, G.V., Vardhan, V.: The dual importance of virtual reality usability in rehabilitation: A focus on therapists and patients. *Cureus* 16(3), e56724 (March 2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.56724>
12. de Oliveira, P.F., Alves, R.d.S., Iunes, D.H., de Carvalho, J.M., Borges, J.B.C., Menezes, F.d.S., Carvalho, L.C.: Effect of exergaming on muscle strength, pain, and functionality of shoulders in cancer patients. *Games for Health Journal* 9(4), 297–303 (2020)
13. Paredes, H., Paulino, D., Barroso, J., Abrantes, C., Machado, I., Silva, I.: Supervised physical exercise therapy of peripheral artery disease patients: M-health challenges and opportunities (2021)
14. Richardson, C.R., Franklin, B., Moy, M.L., Jackson, E.A.: Advances in rehabilitation for chronic diseases: improving health outcomes and function. *Bmj* 365 (2019)
15. Sauro, J.: ways to interpret a sus score—measuringu. *Measuring U*. Retrieved June 25, 2024 (5)

16. Sauro, J., Lewis, J.R.: Quantifying the user experience: Practical statistics for userresearch. Morgan Kaufmann (2016)
17. Tuena, C., Pedrolí, E., Trimarchi, P.D., Gallucci, A., Chiappini, M., Goulene, K.,Gaggioli, A., Riva, G., Lattanzio, F., Giunco, F., et al.: Usability issues of clinical and research applications of virtual reality in older people: A systematic review. *Frontiers in Human Neuroscience* 14, 93 (2020)
18. Vieira, C., da Silva Pais-Vieira, C.F., Novais, J., Perrotta, A., et al.: Seriousgame design and clinical improvement in physical rehabilitation: systematic review. *JMIR Serious Games* 9(3), e20066 (2021)
19. Zanatta, F., Giardini, A., Pierobon, A., D'Addario, M., Steca, P.: A systematicreview on the usability of robotic and virtual reality devices in neuromotor rehabilitation: patients' and healthcare professionals' perspective. *BMC health services research* 22(1), 523 (2022)
20. Chang, Y.-S., Zheng, Y.-X., Ku, Z.-Y.: Comparative analysis of lightweight OpenPose and MoveNet AI models for real-time fall detection and alert systems. *Sensors and Materials* 37(4), 1657–1679 (2025).<https://doi.org/10.18494/SAM5420>
21. Zhou, X., Wang, D., Krähenbühl, P.: Objects as Points. *arXiv e-prints*, arXiv:1904.07850 (2019). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.07850>
22. He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., Girshick, R.: Mask R-CNN. *arXiv e-prints*, arXiv:1703.06870 (2017). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.06870>
23. Ren, S., He, K., Girshick, R., Sun, J.: Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *arXiv e-prints*, arXiv:1506.01497 (2015).

Anexos

Figura 1. Ergômetro modificado para os membros inferiores e suporte para notebook.

Figura 2. Ambiente virtual semi-imersivo.

Tabela 1. Resultados SUS e interpretações.

CÓDIGO: ET1495

AUTOR: MARIA CLARA PARPINELLI DA SILVA CHAVES

ORIENTADOR: EVERTON SANTI

TÍTULO: Implementação e Análise de Modelos e Algoritmos para a Geração de Grades Horárias no Ensino Superior

Resumo

A elaboração de horários acadêmicos é um problema clássico da programação combinatória, classificado como NP-difícil, devido à grande quantidade de recursos e restrições envolvidas. Este trabalho propõe um modelo de Programação Linear Inteira (PLI) para apoiar a geração de horários do Bacharelado em Ciências e Tecnologia (BCT) da UFRN, contemplando demandas de turmas, disponibilidade de salas e especificidades curriculares. A metodologia adotou uma abordagem estruturada da Pesquisa Operacional, com coleta de dados, formulação do modelo e implementação em Python e AMPL, utilizando o solver CPLEX. Os resultados mostraram que, em instâncias reduzidas, o modelo gera horários viáveis em tempo computacional adequado, respeitando todas as restrições. Entretanto, verificou-se limitação de escalabilidade, inviabilizando sua aplicação direta em cenários completos. O estudo aponta a necessidade de ajustes metodológicos, uso de metaheurísticas e desenvolvimento de interfaces para aplicação prática em larga escala.

Palavras-chave: Programação Linear Inteira; Geração de Horários; Otimização.

TITLE: Implementation and Analysis of Models and Algorithms for Timetable Generation in Higher Education

Abstract

The construction of academic timetables is a classical combinatorial optimization problem, classified as NP-hard, due to the variety of resources and constraints involved. This study proposes an Integer Linear Programming (ILP) model to support timetable generation for the Interdisciplinary Bachelor's Degree in Science and Technology (BCT) at UFRN, considering course demand, classroom availability, and curricular requirements. The methodology followed an Operations Research approach, including data collection, model formulation, and implementation in Python and AMPL, using the CPLEX solver. Results showed that, for reduced instances, the model successfully generated feasible timetables within reasonable computational time, fulfilling all constraints. However, scalability limitations were observed, preventing its direct application to full-scale scenarios. The study highlights the need for methodological improvements, heuristic approaches, and user-friendly interfaces to enable practical adoption in real contexts.

Keywords: Integer Linear Programming; Timetabling; Optimization.

Introdução

A elaboração de horários acadêmicos é um dos problemas clássicos de programação combinatória, caracterizado por sua elevada complexidade devido à diversidade de recursos e restrições envolvidas. Esse desafio, conhecido como University Course Timetabling Problem (UCTP), exige a alocação de disciplinas, professores, salas e turmas em períodos de tempo, respeitando simultaneamente restrições rígidas como disponibilidade de salas e incompatibilidade de horários e restrições flexíveis, relacionadas a preferências de docentes e estudantes.

Trata-se de um problema comprovadamente NP-difícil, cuja resolução manual, tradicionalmente adotada em muitas instituições, consome tempo e dificilmente consegue contemplar todas as condições impostas. O aumento no número de cursos, a limitação de espaços físicos e a necessidade de reduzir conflitos de agenda têm impulsionado o desenvolvimento de modelos matemáticos e heurísticos capazes de gerar soluções viáveis em tempo adequado.

Neste trabalho, o objetivo é propor um modelo matemático baseado em Programação Linear Inteira (PLI) para apoiar a geração de grades horárias do Bacharelado em Ciências e Tecnologia (BCT) da Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN (ECT/UFRN) levando em consideração as especificações informadas pelos gestores da UAE e Coordenação do curso. O cenário da ECT é particularmente desafiador, dado o elevado número de turmas, a alta demanda por vagas e a limitação de salas próprias.

Assim, o restante deste artigo está organizado da seguinte forma a Seção 2 descreve a metodologia adotada e os procedimentos de construção do modelo. A Seção 3 apresenta um esboço dos resultados e discussões, incluindo os experimentos planejados e os potenciais benefícios da formulação proposta. A Seção 4 reúne o esboço de conclusão, destacando as principais contribuições e indicando perspectivas para trabalhos futuros. Em seguida, são listadas as referências utilizadas, no Anexo I encontra-se a formulação matemática completa do modelo desenvolvido e no Anexo II são apresentadas as tabelas e figuras correspondentes à seção de resultados e discussões.

Metodologia

O desenvolvimento deste estudo seguiu uma abordagem estruturada baseada nas etapas de Pesquisa Operacional, conforme proposta por Wagner (1986), com foco na construção de uma grade de horários para o curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia (BCT) da Escola de Ciências e Tecnologia (ECT). Inicialmente, realizou-se uma revisão da literatura relacionada ao problema de construção de horários universitários (UCTP), com o objetivo de compreender a estrutura do problema e identificar diferentes estratégias de formulação e resolução. Paralelamente, foram coletados dados sobre a demanda por turmas e vagas das disciplinas obrigatórias do BCT para o semestre 2024.1, informações sobre o espaço físico disponível no prédio do curso e detalhes das grades curriculares diurna e noturna. Estes dados foram organizados e armazenados em planilhas eletrônicas por meio do Google Sheets, permitindo um tratamento adequado das informações. Além disso, foram

levantados os requisitos necessários para a geração do horário junto à Comissão de Horários, à Direção e à Coordenação do curso.

A partir deste levantamento, foi formulado um modelo de Programação Linear Inteira (PLI) que contempla todos os requisitos considerados essenciais para a construção da grade de horários. A formulação do modelo foi desenvolvida de forma iterativa, em paralelo à implementação computacional, permitindo ajustes e melhorias na definição das restrições e na otimização da solução, de modo a garantir horários de qualidade e tempos de resolução computacionalmente viáveis.

Na etapa de implementação, foram desenvolvidos diversos recursos computacionais para apoiar a resolução do modelo. Entre eles, destaca-se um gerador de instâncias em Python, utilizando o módulo Pandas, capaz de simular diferentes cenários de oferta de turmas, com variações no número de vagas e períodos específicos. Também foi realizada a implementação do modelo em AMPL, integrado à linguagem Python, permitindo a execução automatizada de experimentos por meio de *scripts* em *Bash*. Para facilitar a análise dos resultados, foi desenvolvido um gerador de visualizações em formato tabular, utilizando Python e o módulo Tabulate, possibilitando a apresentação organizada das soluções obtidas.

O processo de construção da grade de horários na ECT envolve a participação de Câmaras Temáticas (CTs), que indicam a estimativa de oferta de turmas e vagas por disciplina em cada turno, e a Comissão de Horários, composta por docentes representantes das diferentes CTs. Esta comissão é responsável por definir os requisitos e restrições do planejamento, bem como preferências relacionadas à alocação das aulas. O modelo proposto leva em consideração a demanda por vagas em cada componente curricular em cada turno como fixa, sendo que a resolução do modelo decidirá quais de quantas turmas deverá abrir, bem como sua capacidade de forma a suprir a demanda. Além disso, incorpora as especificidades, incluindo a sincronização de turmas de mesma disciplina, a limitação de dias consecutivos de aula, a distribuição das disciplinas conforme carga horária semanal e o uso adequado do espaço físico disponível.

As restrições do modelo foram formuladas como hard constraints, ou seja, condições obrigatórias que devem ser atendidas para garantir a viabilidade do horário. Entre os principais requisitos considerados estão: alocação adequada de salas conforme capacidade, atendimento à carga horária semanal, exclusividade de uso de salas por dia e horário, sincronização de turmas de mesma disciplina, limitação de aulas diárias, restrições de dias específicos para disciplinas de 60 e 90 horas, e prevenção de conflitos entre componentes curriculares de mesmo período. Além das restrições que garantem a viabilidade, o modelo também inclui condições para eliminar simetrias e reduzir o espaço de busca, acelerando o processo de resolução.

Por fim, a análise dos resultados buscou validar a aplicabilidade do horário gerado, considerando a viabilidade computacional e os tempos de execução necessários para utilização prática pelos gestores do curso.

Resultados e Discussões

Os experimentos realizados permitiram avaliar a aplicabilidade do modelo proposto no processo de construção da grade de horários do curso. A resolução foi conduzida no ambiente ColabEduc, utilizando o *solver* CPLEX em sua configuração padrão. Observou-se que o modelo apresentou dificuldades em lidar com instâncias de maior porte, especialmente quando considerada a totalidade da demanda real. Nesses casos, os tempos de execução se mostraram proibitivos, impossibilitando a obtenção de soluções em tempo hábil.

Ainda assim, foi possível extrair resultados de instâncias reduzidas, como no cenário que corresponde a 80% da demanda real, limitado ao 1º período do curso no turno noturno. Para este caso, o modelo alcançou uma solução viável em 18,55 segundos, com valor da função objetivo $Z = 0,2197$. A Tabela 1 resume as principais estatísticas de execução obtidas.

O horário resultante para o caso de 80% da demanda está ilustrado na Figura 1, que apresenta a distribuição das disciplinas do 1º período noturno entre dias, horários e salas. Essa tabela foi gerada automaticamente por meio de um script em Python utilizando o módulo Tabulate, o que permitiu estruturar os dados em formato legível e de fácil conferência pelos usuários. Pode-se notar que o modelo respeitou os requisitos definidos, como a sincronização de turmas de mesmo componente curricular e a alocação de espaços compatíveis com o tamanho das turmas.

A análise do resultado também permite avaliar o atendimento à demanda dos diferentes componentes curriculares. No caso exemplificado, todas as disciplinas essenciais do primeiro período foram contempladas, ainda que com um número reduzido de turmas em relação ao cenário real. A Tabela 2 apresenta um resumo do atendimento da demanda por componente curricular.

A partir dessa análise, conclui-se que, embora o modelo seja capaz de gerar horários aderentes às restrições impostas e coerentes com a estrutura curricular, sua principal limitação está no tempo de processamento, que inviabiliza a aplicação direta em instâncias de maior porte. Por outro lado, em cenários reduzidos ou simplificados, a formulação demonstra-se eficiente e válida, produzindo soluções consistentes com as práticas adotadas manualmente pela Comissão de Horários.

Conclusão

Neste trabalho, foi apresentado um modelo de Programação Linear Inteira para a geração da grade de horários do Bacharelado Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia, cujo objetivo central é organizar as aulas práticas e teóricas de forma a otimizar a utilização do espaço físico disponível, assegurando a consistência das alocações e permitindo, quando necessário, o uso de salas de outros departamentos. Os resultados demonstraram que o modelo é capaz de produzir grades de horários viáveis e coerentes com as exigências curriculares, atendendo às demandas de diferentes componentes de um mesmo período. A saída gerada, estruturada com o auxílio de scripts em Python e do módulo Tabulate, possibilitou uma visualização clara e organizada dos horários resultantes, favorecendo a interpretação por parte dos gestores.

Contudo, foi constatado que a formulação proposta apresenta limitações de escalabilidade. Embora funcione adequadamente em cenários reduzidos, como no caso de 80% da demanda, considerando apenas o primeiro período e o turno noturno, a resolução de instâncias completas com 100% ou mais da demanda real não foi obtida em tempo hábil, inviabilizando a aplicação direta em contextos mais próximos da realidade do curso. Diante disso, entende-se que o modelo cumpre um papel inicial importante, pois comprova a viabilidade matemática da formulação e sua capacidade de representar corretamente o problema, mas a dependência de altos tempos de processamento para instâncias maiores indica a necessidade de avanços.

Nesse sentido, ajustes na formulação, a implementação de técnicas de pré-processamento mais robustas, a exploração de metaheurísticas para obtenção de soluções aproximadas em tempo reduzido e o desenvolvimento de uma interface acessível aos gestores surgem como direções futuras para tornar o modelo aplicável em cenários de escala real. Assim, conclui-se que este estudo representa um passo inicial promissor para a automatização da geração de horários, ainda que demandando refinamentos metodológicos e computacionais para alcançar maior aplicabilidade prática.

Referências

BURKE, E. K.; DE WERRA, D.; KINGSTON, J. H. Applications to timetabling. In: GROSS, J. L.; YELLER, J. (eds.). Handbook of Graph Theory. Boca Raton: CRC Press, 2004. p. 445–474. Acesso em 10 de agosto de 2025.

CHEN, R.-M.; SHIH, H.-F. Solving university course timetabling problems using constriction particle swarm optimization with local search. Algorithms, v. 6, n. 2, p. 227–244, 2013. Acesso em 11 de agosto de 2025.

ECT. Escola de Ciências e Tecnologia. Disponível em <https://www.ect.ufrn.br>. Acesso em 10 de agosto de 2025.

LÜBBECKE, M. E.; LAUER, F.; SCHRADER, D. Course timetabling and student scheduling with SAT. Annals of Operations Research, v. 275, p. 159–179, 2019. Acesso em 11 de agosto de 2025.

MOKHTARI, M.; SARASHK, M. V.; ASADPOUR, M.; SAEIDI, N.; BOYER, O. Developing a model for the university course timetabling problem: a case study. Complexity, v. 2021, p. 1–12, 2021. Acesso em 12 de agosto de 2025.

TAVAKOLI, M. M. et al. Proposing a novel heuristic algorithm for university course timetabling problem with the quality of courses rendered approach: a case study. Alexandria Engineering Journal, v. 59, p. 3355–3367, 2020. Acesso em 13 de agosto de 2025.

Wagner, H. M. Pesquisa Operacional. Prentice-Hall do Brasil, 1986. Acesso em 10 de agosto de 2025.

Anexos

Anexo I - página 01

Anexo I - página 02

Anexo I - página 03

Anexo I - página 04

Anexo II - Página 01

Anexo II - Página 02

CÓDIGO: ET1542

AUTOR: LUCAS COSTA DE ARAUJO

COAUTOR: ALEX ARAUJO DE SOUZA

COAUTOR: BRENO CAMARA CAVALCANTI

ORIENTADOR: SALETE MARTINS ALVES

TÍTULO: Aprimoramento das Propriedades Tribológicas do Aço AISI 52100 por Técnica de Deposição a Plasma com Cilindros Catódicos

Resumo

O setor eólico vem se expandindo como alternativa de geração de energia renovável no Brasil. Contudo, a vida útil dos componentes de aerogeradores é comprometida pela elevada frequência de falhas nos rolamentos. Este trabalho teve como objetivo otimizar o desempenho tribológico do aço AISI 52100, amplamente empregado nesses componentes, por meio da deposição de filmes finos a plasma com cilindros catódicos de Ti + Al₂O₃. Dois tratamentos foram realizados, variando a composição da atmosfera gasosa (N₂/H₂) e a temperatura de deposição, para avaliar seus efeitos sobre dureza superficial, coeficiente de atrito e desgaste. As amostras foram caracterizadas por ensaios de microdureza Vickers, pino sobre disco e difração de raios X (DRX). Os resultados indicaram aumento de até 120% na dureza superficial e redução de até 52,5% no coeficiente de atrito. A análise por DRX confirmou a formação de nitretos de titânio (TiN) e de ferro (Fe₄N) na superfície tratada. Conclui-se que a técnica empregada é eficaz para melhorar a resistência ao desgaste de aços ligados, com potencial de aplicação em componentes críticos da indústria eólica e de outros setores que demandam elevada durabilidade.

Palavras-chave: DEPOSIÇÃO A PLASMA, AÇO AISI 52100, CILINDROS CATÓDICOS, DESGASTE

TITLE: Enhancement of the Tribological Properties of AISI 52100 Steel by Plasma Deposition Technique Using Cathodic Cylinders

Abstract

The wind energy sector has been expanding as an alternative source of renewable energy in Brazil. However, the service life of wind turbine components is compromised by the high frequency of bearing failures. This study aimed to optimize the tribological performance of AISI 52100 steel, widely used in such components, through plasma thin-film deposition using Ti + Al₂O₃ cathodic cylinders. Two treatments were carried out, varying the gaseous atmosphere composition (N₂/H₂) and deposition temperature, to assess their effects on surface hardness, friction coefficient, and wear. The samples were characterized by Vickers microhardness testing, pin-on-disk tribometry, and X-ray diffraction (XRD). Results indicated an

increase of up to 120% in surface hardness and a reduction of up to 52.5% in the average friction coefficient. XRD analysis confirmed the formation of titanium nitride (TiN) and iron nitride (Fe_4N) on the treated surface. It is concluded that the applied technique is effective in improving the wear resistance of alloy steels, with potential applications in critical components of the wind energy industry and other sectors requiring high durability.

Keywords: PLASMA DEPOSITION, AISI 52100 STEEL, CATHODIC CYLINDERS, WEAR

Introdução

Apesar do avanço tecnológico e da ampla disseminação de parques eólicos em diversas regiões do mundo, a operação dessas usinas ainda enfrenta desafios significativos relacionados à confiabilidade dos componentes mecânicos. Falhas em elementos como rolamentos principais podem comprometer o desempenho das turbinas, aumentar o tempo de inatividade e elevar os custos de manutenção.

De acordo com Liu et al. (2024), um estudo abrangente realizado em 57 parques eólicos identificou 1.752 falhas distintas, distribuídas em 31 tipos diferentes. Dentre essas ocorrências, cerca de 40,3% das falhas estavam associadas aos rolamentos do gerador. Uma das estratégias utilizadas para melhorar o desempenho tribológico de componentes metálicos é a modificação de sua superfície por meio da deposição de filmes finos, que atuam como barreiras protetoras contra desgaste, atrito e corrosão.

A deposição de filmes por plasma é uma técnica amplamente utilizada para criar revestimentos finos em diversos materiais, destacando-se a deposição por plasma com cilindros catódicos (CCyPD) como técnica inovadora e recentemente desenvolvida por Medeiros Neto et al. (2024).

Esse processo consiste em introduzir gases em uma câmara de vácuo, onde é aplicada uma diferença de potencial entre um cátodo (o alvo do material a ser depositado) e o substrato. O plasma gerado acelera os íons do gás contra o alvo, promovendo a ejeção (sputtering) de átomos que se depositam sobre a superfície do substrato (MELO, 2017).

O objetivo geral deste trabalho é a otimização do desempenho tribológico do aço AISI 52100, empregado em rolamentos de aerogeradores, visando ao prolongamento de sua vida útil. São investigadas a influência da composição da atmosfera gasosa nos parâmetros de deposição a plasma, a capacidade de redução de desgaste e de coeficiente de atrito das amostras tratadas em relação as não tratadas, a microdureza superficial dos filmes em comparação com a dureza do substrato não tratado, a composição química do filme e a formação de fases.

Metodologia

Amostras de aço AISI 52100 foram previamente usinadas em forma de cilindros com dimensões padronizadas de 22,5 mm de diâmetro e 7 mm de altura e, em

seguida, todos os substratos passaram por tratamento térmico de têmpera (850°C), revenimento (200°C) e foram polidas metalograficamente.

Os cilindros catódicos foram confeccionados utilizando pós de Ti (75% em peso) e Al₂O₃ (25% em peso) previamente moídos por 24 horas em moinho planetário de alta energia, peneirados em 325 mesh e prensados em matriz de compactação com carga de 4 toneladas.

Após a compactação dos cilindros catódicos, foram realizadas duas deposições distintas de filmes finos em um reator a plasma, operando sob atmosfera controlada em regime de corrente contínua. O primeiro tratamento (P.T.1) operou sob os seguintes parâmetros: atmosfera de 20% de N₂ e 80% de H₂, temperatura de 400 °C e duração de 3 horas. O segundo tratamento (P.T.2) operou sob os seguintes parâmetros: atmosfera de 80% de N₂ e 20% de H₂, temperatura de 350 °C e mesmo tempo de duração. A Figura 1 apresenta o esquema de montagem do reator utilizado no processo de deposição por plasma.

As amostras foram submetidas a um conjunto de técnicas de caracterização, incluindo difração de raios X (DRX), ensaios de microdureza Vickers, perfilometria e testes tribológicos do tipo pino sobre disco.

No ensaio tribológico, foram adotados parâmetros experimentais padronizados, consistindo em um tempo total de 30 minutos, velocidade de rotação de 80 RPM e raio de trilha de 10 mm, de modo a permitir a comparação confiável dos resultados obtidos entre as diferentes amostras.

Resultados e Discussões

Os resultados de microdureza das amostras tratadas e não tratadas estão apresentados na Figura 2. A amostra P.T.1 apresentou um aumento considerável na microdureza (802 HV), o que pode ser atribuído à incorporação inicial de nitrogênio na superfície e subsequente formação de nitretos, ainda que em menor quantidade, conforme discutido por Khoo et al. (2004). O hidrogênio, em maior proporção nessa etapa, pode atuar como agente redutor e contribuir para a limpeza da superfície metálica, facilitando a difusão inicial dos átomos de nitrogênio e a redução de óxidos.

Na amostra P.T.2 houve aumento significativo na microdureza (1204 HV), indicando uma maior incorporação de nitrogênio na estrutura superficial da amostra, apesar da redução de temperatura. A alta concentração de nitrogênio disponível na câmara tende a favorecer a formação de uma camada mais espessa e densa de nitretos que aumentam substancialmente a dureza superficial dos materiais metálicos. Esse comportamento está de acordo com o relatado por Medeiros Neto (2024), que aponta para o fortalecimento superficial promovido pela formação de fases duras com o aumento da concentração de nitrogênio e temperatura.

Os resultados de ensaio de desgaste por pino-sobre-disco mostraram uma redução significativa no coeficiente de atrito (COF) nas amostras tratadas em comparação

com a amostra não tratada, que apresentou um valor médio de 0,40. Os dados destes ensaios estão apresentados na Figura 3.

A análise de difração de raios X, com o auxílio do software HighScore X'Pert, permitiu identificar como fases predominantes a fase nitretada Fe_4N e o nitreto de titânio TiN nos substratos, conforme evidenciado na Figura 4. Observa-se que, na amostra P.T.1, os picos principais estão localizados aproximadamente em $2\theta \approx 41^\circ$, $44,5^\circ$ e 70° , os quais são característicos da fase Fe_4N , conforme relatado por Zhang et al. (2023). Já na amostra P.T.2, com maior concentração de nitrogênio (80%), observa-se o surgimento de novos picos em torno de $2\theta \approx 36^\circ$, 42° e 75° , compatíveis com a formação de TiN , conforme os dados obtidos por Gu et al. (2018). A presença dessas fases sugere que o aumento da fração de nitrogênio favoreceu não apenas o espessamento do filme, mas também a formação de compostos mais estáveis e cristalinos como o TiN , que possui forte orientação preferencial na direção (200) e (111), frequentemente observada entre 36° e 43° .

Com a perfilometria tridimensional foi possível avaliar os perfis de desgaste das trilhas formadas durante o ensaio de pino sobre disco nas amostras tratadas e não tratada, a partir dos quais foram extraídos parâmetros relevantes de acabamento superficial, como PV (altura pico-vale), RMS (raiz média quadrática) e Ra (rugosidade média). Esses dados fornecem uma base comparativa importante para avaliar a eficiência do revestimento.

A amostra não tratada apresentou os maiores valores para todos os parâmetros analisados, refletindo uma superfície mais irregular e rugosa na trilha, possivelmente associada a um maior desgaste. A amostra P.T.1 demonstrou uma redução expressiva em todos os parâmetros, indicando uma superfície com menores irregularidades, o que sugere a formação de um filme protetor mais uniforme, capaz de reduzir o desgaste. Já a amostra P.T.2 apresentou o menor valor de PV ($2,497 \mu\text{m}$), evidenciando uma significativa redução na profundidade total dos desgastes e maior resistência à remoção de material.

Os valores médios de rugosidade (RMS e Ra) podem não refletir com precisão a real severidade do desgaste, pois são influenciados por picos e vales localizados. Isso é corroborado pela Figura 5, na qual se observa que a amostra do Tratamento 2 apresenta o perfil de desgaste com menor amplitude, variando de cerca de $+0,8 \mu\text{m}$ a $-1,7 \mu\text{m}$ (total de $2,5 \mu\text{m}$). Em seguida, a amostra do Tratamento 1 apresenta um perfil mais profundo, com amplitude de cerca de $3,2 \mu\text{m}$ (entre $+1,0 \mu\text{m}$ e $-2,2 \mu\text{m}$). Por fim, a amostra sem tratamento exibe o sulco mais acentuado, com amplitude máxima de aproximadamente $6,5 \mu\text{m}$ (de $+1,0 \mu\text{m}$ até $-5,5 \mu\text{m}$).

Esses resultados demonstram que os tratamentos superficiais — especialmente o Tratamento 2 — foram eficazes em reduzir a profundidade e a severidade do desgaste nas trilhas do ensaio, em comparação à condição original não tratada.

Conclusão

O uso da técnica de deposição a plasma com cilindros catódicos contendo Ti + Al₂O₃ é eficaz na melhoria das propriedades tribológicas do aço AISI 52100. Foi possível observar um aumento expressivo da dureza superficial nas amostras tratadas, em especial nas condições com maior proporção de nitrogênio na atmosfera de deposição. Este comportamento está associado à formação de estruturas densas e à difusão eficiente de nitrogênio, conforme evidenciado pelos resultados da análise de difração de raios X. Adicionalmente, a análise do coeficiente de atrito revelou evidente redução nas amostras tratadas, especialmente em P.T.2, que apresentou o menor valor de atrito (0,19). Isso evidencia que a superfície modificada atua como uma barreira protetora eficaz contra desgaste e adesão, contribuindo para maior eficiência e vida útil do componente.

Referências

GU, Peng; ZHU, Xinghua; LI, Jitao; WU, Haihua; YANG, Dingyu. Influence of substrate and Ar/N₂ gas flow ratio on structural, optical and electrical properties of TiN thin films synthesized by DC magnetron sputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 29, p. 9893-9900, abr. 2018. DOI: 10.1007/s10854-018-9031-2.

KHOO, Khyoupin; TAKEUCHI, Manabu; ONUKI, Jin; URAO, Ryoichi. Microwave plasma nitriding of hollow tube inner wall. *Materials Transactions*, v. 45, n. 2, p. 599–601, 2004. DOI: 10.2320/matertrans.45.599.

LIU, H. et al. Wind turbine generator failure analysis and fault diagnosis: A review. *IET Renewable Power Generation*, v. 18, n. 15, p. 3127–3148, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1049/rpg2.13104>. Acesso em: 14 maio 2025.

MEDEIROS NETO, J. F. et al. Plasma deposition from cathodic cylinders: A technology for reduction of metallic oxides and deposition of wear-resistant films. *Surface and Coatings Technology*, v. 488, p. 131027, 2024.

MELO, Adolfo. Sputtering: uma técnica para produção de nanotecnologia. Saense. Publicado em 28 de dezembro de 2017. Disponível em: <http://www.saense.com.br/2017/12/sputtering-uma-tecnica-para-producao-denanotecnologia/>. Acesso em: 4 jul. 2025.

ZHANG, Chaoyun; PENG, Xiaoling; LI, Jing; ELLIS, Tristan. Design, preparation, and magnetic properties of Fe₄N/Fe₃N soft magnetic composites fabricated by gas nitridation. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, v. 36, n. 3, p. 1–7, fev. 2023. DOI: 10.1007/s10948-023-06521-8.

Anexos

FIGURA 1. Esquema do reator para CCyPD.

FIGURA 2. Microdureza Vickers.

FIGURA 3. Coeficiente de atrito.

FIGURA 4. Difração de Raios-X.

FIGURA 5. Perfilometria dos substratos (a) não tratado (b) tratamento 1 (c) tratamento 2.

CÓDIGO: ET1544

AUTOR: VINICIUS WALLACE REBOUCAS SILVA

ORIENTADOR: BRUNO MARQUES FERREIRA DA SILVA

TÍTULO: Estudo e Utilização de ROS2 com drones para navegação e detecção de objetos

Resumo

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema de controle autônomo para drones por meio de técnicas de visão computacional, utilizando marcadores ArUco como referência visual, além de ROS2 para as movimentações. O estudo teve como foco a implementação de algoritmos capazes de permitir que o drone DJI Tello ajustasse sua posição e mantivesse o marcador centralizado, explorando estratégias de controle inspiradas em controladores do tipo PID e integrando o equipamento com dispositivos móveis. A metodologia adotada envolveu tanto testes em cenários controlados quanto a adaptação do sistema a novas condições operacionais, promovendo uma análise detalhada das possibilidades de movimentação autônoma. O trabalho evidencia a importância de se desenvolver abordagens inovadoras em tecnologias consolidadas, visando ampliar a autonomia, a eficiência e as aplicações de drones em contextos diversos, incluindo pesquisa acadêmica, monitoramento ambiental, logística e automação de processos. Ao propor soluções que permitem maior independência do operador e flexibilidade operacional, o estudo contribui para o avanço do conhecimento na área de sistemas robóticos e reforça o potencial de integração de drones com tecnologias emergentes.

Palavras-chave: Drones, Visão Computacional, ArUco, Controle Autônomo, DJI Tello.

TITLE: Study and Use of ROS2 with drones for navigation and object detection

Abstract

The present work addresses the development of an exclusive control system for drones using computer vision techniques, using ArUco markers as a visual reference for navigation. The study focused on implementing algorithms capable of allowing the DJI Tello drone to adjust its position and keep the marker centered, exploring control strategies inspired by PID controllers and integrating the equipment with mobile devices. The methodology involved both testing in controlled scenarios and adapting the system to new operational conditions, promoting a specific analysis of the possibilities for autonomous delivery. The work highlights the importance of developing innovative approaches to consolidated technologies, expanding the autonomy, efficiency and applications of drones in different contexts, including academic research, environmental monitoring, logistics and process automation. By proposing solutions that allow greater operator independence and operational flexibility, the study contributes to the advancement of knowledge in the area of robotic systems and reinforces the potential for integrating drones with emerging technologies.

Keywords: Drones, Computer Vision, ArUco, Autonomous Control, DJI Tello.

Introdução

O desenvolvimento dos veículos aéreos não tripulados, popularmente conhecidos como drones, tem origem no início do século XX, inicialmente voltado a fins militares, especialmente como aeronaves de reconhecimento e de apoio em treinamentos. Nas décadas seguintes, sobretudo a partir da segunda metade do século XX, houve avanços significativos em sistemas de rádio-comunicação, sensores e navegação, o que possibilitou o uso mais amplo desses equipamentos em operações estratégicas. No cenário atual, observa-se um processo contínuo de desenvolvimento tecnológico, caracterizado pela incorporação de câmeras de alta resolução, sensores multiespectrais e sistemas de georreferenciamento, aliados a algoritmos de inteligência artificial que permitem maior autonomia de voo (RASHID et al., 2025). Tais avanços expandiram o uso dos drones para diferentes áreas, como agricultura de precisão, monitoramento ambiental, mapeamento de terrenos, inspeção de infraestruturas e logística (OTTO et al., 2018). Ademais, pesquisas recentes indicam tendências de integração desses veículos em redes de comunicação 5G, aumento da eficiência energética por meio de baterias de nova geração e, em médio prazo, sua inserção em sistemas de mobilidade aérea urbana. Diante dos distintos cenários de evolução tecnológica, tanto no âmbito acadêmico quanto no setor produtivo, a utilização de drones tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para o desenvolvimento de soluções inovadoras. A integração desses veículos com tecnologias emergentes, como inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT) e redes de comunicação de alta velocidade, amplia significativamente o seu potencial de aplicação, permitindo desde a automação de processos até a análise avançada de dados em tempo real. Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de aprofundar pesquisas que busquem não apenas compreender, mas também expandir as formas de utilização dos drones, de modo a gerar novos conhecimentos, otimizar práticas já consolidadas e oferecer alternativas eficazes para desafios contemporâneos e persistentes.

Metodologia

O desenvolvimento deste projeto iniciou-se com um levantamento bibliográfico, aliado ao estudo detalhado do funcionamento do drone DJI Tello, disponível no Laboratório TEAM da UFRN. Essa etapa preliminar teve como finalidade compreender as características técnicas e operacionais do equipamento, que serviria de base para as etapas posteriores da pesquisa. Na sequência, foi implementado um código em Python voltado à realização das movimentações básicas do drone. O controle foi estruturado a partir de técnicas de visão computacional, tomando como referência estudos já existentes (Tracking, 2024). Essa abordagem buscou tanto possibilitar a movimentação autônoma do drone quanto aprimorar a compreensão de sua dinâmica de operação. Para esse fim, utilizou-se um marcador ArUco, que serviu como referência visual para a navegação. O algoritmo foi desenvolvido de modo que, à medida que o marcador se aproximava da câmera do drone, este ajustava sua posição, mantendo uma distância segura. Esse ajuste era definido a partir da proporção do marcador em relação à imagem capturada pela câmera do Tello. Além disso, buscou-se implementar um método para que o drone mantivesse o marcador centralizado em seu campo de visão. Para isso, foi adaptada uma estratégia inspirada em controladores do tipo PID, conforme descrito em Tracking (2024), permitindo que o sistema corrigisse a trajetória do drone e mantivesse o marcador alinhado ao centro da imagem. Com o avanço do projeto, buscou-se validar a aplicação do sistema em um cenário mais prático. Para tal, foi elaborada uma estrutura para acoplar o marcador ArUco na parte superior de um robô móvel Turtlebot. A movimentação

do Turtlebot foi restringida a deslocamentos simples no eixo longitudinal (avanço e recuo) e a rotações em torno do próprio eixo. Dessa forma, o drone deveria ajustar sua posição com base nos deslocamentos do marcador fixado sobre o robô. Para possibilitar essa integração, foi necessário adquirir conhecimentos básicos relacionados ao ROS2 e às técnicas de visão computacional aplicadas ao Turtlebot, ampliando as competências necessárias ao desenvolvimento do trabalho. Assim, à medida que o Turtlebot se movimentava, o marcador era continuamente detectado pela câmera embarcada no drone, permitindo que este realizasse ajustes de posição e mantivesse o marcador centralizado em sua visão.

Resultados e Discussões

Nos primeiros testes com o marcador ArUco, posicionado verticalmente e alinhado à mesma altura do drone, os resultados foram satisfatórios, uma vez que foi possível, por meio de técnicas de visão computacional, realizar movimentações eficientes do Tello. Em seguida, ao posicionar o marcador abaixo do drone, tornou-se necessário o uso de um recurso adicional para que a câmera do Tello pudesse detectá-lo. Para isso, foi desenvolvida uma ferramenta utilizando um espelho, posicionado com uma inclinação de 60° em relação ao chão, de modo que a câmera captasse a imagem refletida do marcador. Com essa adaptação implementada, novas abordagens de controle de movimentação precisaram ser desenvolvidas devido às novas condições de operação. Embora essas estratégias fossem mais complexas, os resultados mostraram-se satisfatórios, permitindo o alinhamento preciso do drone com o marcador no chão.

Conclusão

O estudo realizado demonstra a relevância da implementação de novas ferramentas em tecnologias já consolidadas, com o objetivo de aprimorar sistemas existentes ou desenvolver novas soluções. Os resultados obtidos mostraram-se promissores, uma vez que foi possível implementar um método que permite ao drone realizar movimentos de forma independente, sem intervenção manual direta. Apesar dos desafios encontrados ao longo do trabalho, como a necessidade de desenvolver uma ferramenta externa e a dificuldade de detecção do marcador ArUco quando posicionado abaixo do drone, foi possível criar e implementar uma solução que potencializa a visão externa de equipamentos importantes, reduzindo a dependência da intervenção humana. Esses resultados evidenciam o potencial de expansão das aplicações de drones em ambientes complexos e reforçam a importância de novas estratégias para otimização e autonomia de sistemas robóticos.

Referências

Otto, Alena et al. "Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey." *Networks*, v. 72, n. 4, p. 411-458, 2018. RASHID, Adib Bin et al. Integration of Artificial Intelligence and IoT with UAVs for Precision Agriculture. *Hybrid Advances*, [S.l.], v. –, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100458> . Acesso em: 30 ago. 2025. CORNEAU, Henrique Antônio Guanais et al. Drone-Based Object Tracking with Convolutional Neural Networks. In: COBICET 2024, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, 2024.

CÓDIGO: ET1589

AUTOR: LUIS FELIPE OLIVEIRA SILVA

COAUTOR: MYLLENA KELY PEREIRA FERREIRA

ORIENTADOR: ELISAMA VIEIRA DOS SANTOS

TÍTULO: Síntese de fotoeletrocatalisadores à base de Nióbio e Ag para tratamento de efluentes

Resumo

Uma heteroestrutura versátil de Nb₂O₅/Ni, adequada para diferentes processos, foi sintetizada com sucesso pela adição de Ni(NO₃)₂ ao processo de síntese Pechini de Nb₂O₅. Os materiais sintetizados foram caracterizados por Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia de Absorção no Ultravioleta-Visível (DRS UV-Vis), enquanto as respostas fotoeletroquímicas foram obtidas por voltametria de varredura linear (LSV), cronoamperometria e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS), utilizando os materiais depositados em uma placa de ITO por método de imersão (dip-coating). A partir das caracterizações destes materiais foi possível verificar que as propriedades do material foram fortemente afetadas pelo dopagem do Nb₂O₅ com Ni. A heteroestrutura (Nb₂O₅/Ni 10%) apresentou desempenho fotoeletrocatalítico superior ao Nb₂O₅ puro, mostrando respostas de fotocorrentes superiores. Nossos resultados indicam que o Nb₂O₅/Ni 10% tem potencial para aplicação em fotoeletrocatalise, permitindo promover reações nos processos oxidativos e redutivos.

Palavras-chave: Nb₂O₅, fotoeletrocatalise

TITLE: Synthesis of Niobium and Ag-based Photoelectrocatalysts for Wastewater Treatment

Abstract

A versatile Nb₂O₅/Ni heterostructure, suitable for different processes, was successfully synthesized by adding Ni(NO₃)₂ to the Pechini Nb₂O₅ synthesis process. The synthesized materials were characterized by X-ray Diffraction (XRD) and Ultraviolet-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV-Vis DRS). The photoelectrochemical responses were evaluated by linear sweep voltammetry (LSV), chronoamperometry, and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), using the materials deposited on an ITO substrate via the dip-coating method. The characterization results revealed that the properties of the material were strongly affected by Ni doping of Nb₂O₅. The Nb₂O₅/Ni (10%) heterostructure exhibited superior photoelectrocatalytic performance compared to pure Nb₂O₅, with enhanced photocurrent responses. Our results indicate that Nb₂O₅/Ni (10%) has strong potential for application in photoelectrocatalysis, enabling both oxidative and reductive processes.

Keywords: Nb₂O₅, photoelectrocatalysis

Introdução

A Agenda 2030, estabelecida em 2015 pelas Nações Unidas, consolidou os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) como o principal marco para orientar governos, empresas e a sociedade civil em direção a um futuro mais equilibrado e justo. Esses 17 objetivos, com 169 metas e 231 indicadores, foram concebidos de forma participativa e abrangente, traduzindo desafios globais em metas mensuráveis e de fácil entendimento para diferentes setores. Nesse contexto, práticas sustentáveis, como o tratamento de efluentes industriais, assumem papel central, pois estão diretamente ligadas à preservação dos recursos hídricos, à saúde pública e à mitigação dos impactos ambientais. A adoção de tecnologias inovadoras para reuso de água e redução da poluição não apenas contribui para metas como o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), mas também fortalece a integração entre desenvolvimento econômico e responsabilidade ambiental. Assim, iniciativas voltadas à sustentabilidade, como o tratamento de efluentes, representam exemplos concretos de como os ODS podem ser internalizados nas práticas produtivas, promovendo transformação social, econômica e ambiental de maneira sistêmica [1, 2].

Diante desse cenário, a eletrooxidação tem se consolidado como uma das tecnologias mais promissoras para o tratamento de efluentes, especialmente diante da presença de contaminantes recalcitrantes e compostos emergentes. Esse processo, baseado na geração in situ de espécies oxidantes altamente reativas, como radicais hidroxila e oxigênio singlete, apresenta vantagens em relação a métodos convencionais, por possibilitar elevada eficiência de degradação e mineralização sob condições operacionais brandas [3, 4]. Quando associada à fotocatalise, a chamada fotoeletrooxidação amplia ainda mais o desempenho do sistema, uma vez que a irradiação luminosa promove a ativação do catalisador, intensificando a quebra de ligações químicas estáveis e mitigando a formação de subprodutos tóxicos. Dessa forma, a integração entre eletrooxidação e fotocatalise não apenas contribui para o avanço de tecnologias ambientais mais eficientes, mas também se insere de maneira estratégica no cumprimento das metas dos ODS [5].

A fotoeletrocatalise, embora promissora para o tratamento de efluentes e aproveitamento da energia solar, ainda enfrenta gargalos como baixa absorção de luz visível, rápida recombinação de cargas, instabilidade dos materiais e desajuste de bandas em heteroestruturas. Esses desafios reforçam a importância da busca por novos semicondutores, capazes de ampliar a faixa espectral e melhorar a eficiência do processo [6].

Nesse contexto, o óxido de nióbio (Nb₂O₅) destaca-se por sua alta estabilidade, baixa toxicidade e abundância no Brasil, maior detentor mundial do recurso. Com band gap adequado e morfologia mesoporosa, o Nb₂O₅ favorece a geração de espécies reativas de oxigênio sob luz solar, mostrando elevada eficiência na descoloração de efluentes têxteis e boa reusabilidade, superando limitações de semicondutores tradicionais como o TiO₂, por exemplo [7].

Neste contexto, o presente trabalho propõe o estudo de catalisadores à base de Nb₂O₅ e Nb₂O₅/Ag para aplicação em processos fotocatalíticos voltados à remoção de corantes reativos em efluentes, incluindo a caracterização morfológica e eletroquímica, bem como

testes de degradação, visando maior eficiência no tratamento de água e alinhamento com os ODS 6, 7, 9 e 13.

Metodologia

O pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) foi sintetizado pelo método do precursor polimérico (Pechini). Inicialmente, 2,16 g de ácido cítrico (Synth) foram dissolvidos em 20 mL de água destilada a 50 °C. Após completa dissolução, 3,08 g de oxalato amoniacal de nióbio ($\text{NH}_4\text{NbO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$), fornecido pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), foram adicionados, mantendo a solução a 50 °C por 30 min para formação do citrato metálico. Em seguida, adicionaram-se 7 g de etilenoglicol (Vetec) e a temperatura foi elevada para 70 °C, sob agitação constante por mais 30 min. A solução resultante foi calcinada em forno mufla, partindo da temperatura ambiente até 600 °C, por 2 h, para obtenção da fase ortorrômbica (T- Nb_2O_5). O material obtido foi macerado e armazenado Figura 1.

Para a incorporação de nanopartículas de prata ($\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ag}$), utilizou-se metodologia adaptada de Khanum et al. (2024), baseada na redução química de íons Ag^+ a Ag^0 sobre a superfície do Nb_2O_5 previamente obtido, visando a modificação catalítica do óxido.

Os catalisadores preparados foram caracterizados por difratometria de raios X (DRX) e espectroscopia de reflectância difusa UV-Vis (DRS UV-Vis).

Para os estudos fotoeletroquímicos, foram preparados eletrodos de Nb_2O_5 e $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ag}$ pelo método de imersão (dip-coating). Para isso, 80 mg do catalisador foram dispersos em 40 mL de solução de álcool isopropílico (60%) e sonicados por 1 h, a fim de se obter dispersão homogênea. Em seguida, substratos de vidro revestidos com óxido de índio-estanho (ITO) foram imersos na suspensão, secos com lâmpada infravermelha e utilizados como eletrodo de trabalho, Figura 2.

As análises fotoeletroquímicas foram conduzidas em uma célula de três eletrodos, contendo solução de Na_2SO_4 0,05 M como eletrólito, sob temperatura ambiente. O contra-eletrodo foi de titânio e o eletrodo de referência Ag/AgCl . As medidas foram realizadas em um potenciostato AUTOLAB PGSTAT302n, acoplado ao software NOVA 1.11.

Para os testes iniciais de degradação fotocatalítica, utilizou-se uma solução aquosa contendo 5 mg L^{-1} do corante Reactive Blue 109, na presença de 0,4 g L^{-1} do catalisador. A reação foi conduzida em uma câmara de fotocatalise (Figura 3), equipada com uma lâmpada Osram Ultravitalux de 300 W como fonte de irradiação. Devido ao aquecimento gerado pela lâmpada, o reator foi acoplado a um banho termostatzado com circulação de água pela camisa externa, de modo a manter a temperatura controlada durante todo o experimento.

Resultados e Discussões

O Nb_2O_5 e o Nb_2O_5 modificado com Ag foram caracterizados por difração de raios X (DRX) a fim de avaliar a pureza estrutural, estimar o tamanho médio de cristalito e investigar a influência da prata nas propriedades cristalinas do óxido. Conforme ilustrado na Figura 4, o padrão de difração do T- Nb_2O_5 apresentou picos em $2\theta = 22,6^\circ$, $28,9^\circ$, $36,5^\circ$, $46,1^\circ$, $49,7^\circ$,

50,7°, 55,1° e 56,2°, correspondentes aos planos cristalinos (001), (200), (181), (002), (0160), (380), (0161) e (380), característicos da fase ortorrômbica do pentóxido de nióbio (PDF#27-1003), confirmando a formação da estrutura desejada em todas as amostras. No caso do Nb₂O₅/Ag, observa-se ainda a presença de picos adicionais atribuídos à prata metálica, em concordância com o padrão cristalográfico PDF#87-597, sugerindo a incorporação bem-sucedida do metal. Além disso, a presença de picos intensos e bem definidos indica elevada cristalinidade dos materiais sintetizados, enquanto a ausência de deslocamento dos picos associados ao Nb₂O₅ após a adição de Ag sugere que a modificação ocorreu predominantemente por deposição de partículas metálicas, e não por substituição na rede cristalina.

A Figura 5a mostra o valor de band gap (E_g) do Nb₂O₅ puro, estimado em 3,33 eV, em concordância com a literatura, confirmando sua baixa eficiência de absorção na região visível. Já a Figura 5b apresenta os resultados para o Nb₂O₅/Ag, que exibiu duas transições ópticas: $E_{g1} = 3,69$ eV, atribuída à matriz de Nb₂O₅, e $E_{g2} = 1,55$ eV, relacionada à presença das nanopartículas de Ag. A Figura 5c compara os espectros de reflectância difusa das amostras, evidenciando que o Nb₂O₅ absorve predominantemente na região do ultravioleta, enquanto a modificação com Ag amplia significativamente a absorção para a faixa da luz visível (400–800 nm), devido ao efeito de ressonância de plásmon de superfície (SPR), favorecendo maior aproveitamento da radiação solar.

A transferência de carga nos sistemas estudados foi avaliada por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), técnica amplamente aplicada em fotoeletrocatalise. As Figuras 6a e 6b apresentam os diagramas de Nyquist obtidos para os eletrodos de ITO, Nb₂O₅ e Nb₂O₅/Ag, tanto sob iluminação quanto no escuro. Observa-se que o Nb₂O₅/Ag apresenta arcos de menor diâmetro em comparação ao Nb₂O₅ puro e ao substrato de ITO, resultado que se torna ainda mais evidente sob irradiação. Esse comportamento pode indicar que a modificação com Ag favorece a separação e o transporte de cargas foto-geradas, reduzindo a resistência de transferência eletrônica na interface eletrodo/eletrólito e promovendo maior eficiência no processo fotoeletrocatalítico.

A Figura 7 apresenta a resposta de fotocorrente das amostras, obtida por cronoamperometria em um potencial de polarização de 1,10 V vs. Ag/AgCl (0,3 mol L⁻¹ KCl) durante 270 segundos, a fim de avaliar a atividade dos materiais sob irradiação luminosa. Os resultados indicam que o Nb₂O₅/Ag exibe desempenho fotoeletroquímico significativamente superior, alcançando uma fotocorrente máxima de aproximadamente 20 μ A, valor cerca de 2,5 vezes maior em comparação ao Nb₂O₅ puro, evidenciando a contribuição das nanopartículas de Ag para a eficiência do processo de separação e transporte de cargas fotoexcitadas.

A Figura 8 apresenta o desempenho dos fotocatalisadores na degradação do corante reativo azul 109. Observa-se que o equilíbrio de adsorção/dessorção foi atingido dentro do tempo estabelecido para todos os ensaios, sendo o Nb₂O₅/Ag o material que apresentou a maior taxa de degradação. A reação foi monitorada por até 120 minutos, período no qual já se nota uma tendência de estabilização. O Nb₂O₅ puro, por sua vez, não promoveu uma remoção significativa do corante, o que pode ser atribuído à sua baixa capacidade de absorção de energia luminosa, conforme indicado pelas análises ópticas. Já a fotólise, quando aplicada apenas à radiação, não demonstrou efeito relevante na degradação do poluente.

Conclusão

Foi utilizado um método simples para sintetizar Nb_2O_5 e $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ag}$ em condições ambientais. As análises de DRX confirmaram a formação bem-sucedida da fase ortorrômbica do Nb_2O_5 , além de evidenciar os picos característicos da prata metálica, indicando a modificação estrutural da superfície. Com base nos estudos fotoeletroquímicos, o $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ag}$ apresentou respostas superiores em voltametria e espectroscopia de impedância eletroquímica em comparação ao Nb_2O_5 puro, tanto no escuro quanto sob irradiação luminosa, demonstrando menor resistência de transferência de carga e maior separação dos portadores fotoexcitados. A resposta de fotocorrente também foi intensificada pela presença de Ag, alcançando valores aproximadamente 2,5 vezes maiores que os do Nb_2O_5 , evidenciando a contribuição das nanopartículas de prata como centros ativos de captura de elétrons. Os testes de fotocatalise heterogênea mostraram que o $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ag}$ apresentou desempenho significativamente superior na degradação do corante reativo azul 109, confirmando seu potencial para futuras aplicações em processos de redução fotoeletrocatalítica, como geração de H_2 e redução de CO_2 , além de usos ambientais no tratamento de efluentes.

Referências

- [1] VAN TULDER, Rob et al. The UN's sustainable development goals: can multinational enterprises lead the decade of action?. *Journal of International Business Policy*, v. 4, n. 1, p. 1, 2021.
- [2] DELANKA-PEDIGE, Himali Madushani Kanchanamala et al. Evaluating wastewater treatment infrastructure systems based on UN Sustainable Development Goals and targets. *Journal of Cleaner Production*, v. 298, p. 126795, 2021.
- [3] BISWAS, Bishwatma; GOEL, Sudha. Sustainable Atrazine Removal from Real Water Matrices Using Solar-Powered Electrooxidation. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 236, n. 3, p. 197, 2025.
- [4] ZHUO, Qiongfang et al. Electrocatalytic oxidation processes for treatment of halogenated organic pollutants in aqueous solution: a critical review. *Acs Es&T Engineering*, v. 2, n. 10, p. 1756-1775, 2022.
- [5] ZHONG, Shuxian et al. Bridge engineering in photocatalysis and photoelectrocatalysis. *Nanoscale*, v. 12, n. 10, p. 5764-5791, 2020. [6] HOU, Yining; et al. Electro-photocatalytic degradation of acid orange II using a novel TiO_2/ACF photoanode. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 407 (2009) 2431 – 2439
- [6] HOU, Yining et al. Electro-photocatalytic degradation of acid orange II using a novel TiO_2/ACF photoanode. *Science of the Total Environment*, v. 407, n. 7, p. 2431-2439, 2009.
- [7] DOS SANTOS, Alexsandro Jhones et al. Niobium oxide catalysts as emerging material for textile wastewater reuse: photocatalytic decolorization of azo dyes. *Catalysts*, v. 9, n. 12, p. 1070, 2019

Anexos

Figura 1 – Ilustração esquemática da obtenção do T-Nb₂O₅ e Nb₂O₅:Ag10% seguindo a rota de pechini.

Figura 2 – O mecanismo do método de revestimento por imersão (dip-coating).

Figura 3 – Câmara de fotocatalise usada para a degradação do Azul Reativo 109.

Figura 4 – Padrões de DRX do (♦) Nb₂O₅, (♦) Nb₂O₅/Ag.

Figura 5 – Análise óptica dos materiais (a) Nb₂O₅ e (b) Nb₂O₅/Ag e (c) espectro de absorção a partir da equação de Kubelka-Munk.

Figura 6 – Diagramas de Nyquist medidos em um potencial fixo de 1,35 V (a) sob iluminação e (b) no escuro

Figura 7 – Fotocorrente medida sob irradiação, aplicando-se um potencial de 1,0 V vs. Ag/AgCl (3,0 mol L⁻¹ KCl), para os para (—) ITO, (—) Nb₂O₅ and (—) Nb₂O₅/Ag.

Figura 8 – Degradação fotocatalítica do corante reativo azul 109 sob (—) fotólise, (—) Nb₂O₅ e (—) Nb₂O₅/Ag.

CÓDIGO: ET1592

AUTOR: IAN ANTONIO FONSECA ARAÚJO

ORIENTADOR: ORIVALDO VIEIRA DE SANTANA JUNIOR

TÍTULO: Uma Classe Generalista para Chatbots com RAG: Arquitetura Modular para Reduzir Alucinações

Resumo

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma classe generalista e reutilizável para a implementação de chatbots, utilizando a arquitetura RAG (Retrieval-Augmented Generation) para mitigar alucinações e aumentar a precisão das respostas. A solução, construída com LangChain, foi projetada para funcionar como uma camada de abstração, permitindo a fácil alternância entre modelos de linguagem executados localmente (via Ollama), que favorecem a privacidade e o controle de custos, e modelos de ponta acessados por API, que garantem desempenho superior. A validação da arquitetura demonstrou que a técnica RAG não só melhora a acurácia, mas também especializa o comportamento do chatbot para domínios específicos.

Palavras-chave: chatbot, LLM, RAG, LangChain

TITLE: A Generalist Class for Chatbots with RAG: Modular Architecture to Reduce Hallucinations

Abstract

This work proposes the development of a generalist and reusable class for chatbot implementation, leveraging the Retrieval-Augmented Generation (RAG) architecture to mitigate hallucinations and improve response accuracy. The solution, built with LangChain, was designed to function as an abstraction layer, enabling seamless switching between locally executed language models (via Ollama), which favor privacy and cost control, and state-of-the-art models accessed through APIs, which provide superior performance. The validation of the architecture demonstrated that the RAG technique not only enhances accuracy but also tailors chatbot behavior to specific domains.

Keywords: chatbot, LLM, RAG, LangChain

Introdução

O avanço da inteligência artificial (IA) nos últimos anos tem proporcionado impactos significativos em diferentes setores, impulsionado principalmente pelo desenvolvimento de técnicas de aprendizado de máquina e, mais recentemente, por modelos de linguagem de grande porte (LLMs). Soluções baseadas em IA estão cada vez mais presentes em áreas como saúde, educação, entretenimento e comunicação, evidenciando o seu papel como tecnologia

transformadora (Das Dores, 2020).

Um dos principais entraves no uso de LLMs para construção de chatbots é a ocorrência de alucinações, quando o modelo gera respostas incorretas ou sem fundamento. Nesse sentido, estratégias como o Retrieval-Augmented Generation (RAG) têm se destacado por reduzir esse problema, ao permitir que o modelo utilize bases externas de conhecimento como suporte para a geração de respostas mais consistentes e contextualizadas.

Diante desse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma classe generalista para a implementação de chatbots com suporte a RAG. A proposta consiste em oferecer uma estrutura modular e reutilizável, capaz de ser aplicada em diferentes contextos, indo além de aplicações restritas a um único domínio. O objetivo é fornecer uma base que facilite a construção de soluções mais confiáveis e adaptáveis, permitindo que a mesma lógica de negócio opere tanto com modelos executados localmente, que priorizam privacidade e controle de custos, quanto com modelos de ponta via API, que garantem performance superior. A solução busca, assim, atuar como uma camada de abstração que capacita o desenvolvedor a gerenciar o trade-off estratégico entre essas abordagens, de acordo com os requisitos específicos de cada aplicação.

Metodologia

A arquitetura de um chatbot que utiliza um LLM com a técnica de RAG é composta por múltiplos componentes interligados. O processo inicia na interface de usuário, que captura a mensagem e a envia ao sistema. Um subsistema de gestão de sessão e memória preserva o contexto da conversa, permitindo que a consulta do usuário seja usada para buscar informações relevantes em um banco de dados vetorial. O LLM, então, recebe esses dados recuperados, o histórico da conversa e um prompt de sistema para gerar a resposta final, que é devolvida ao usuário pela interface.

Um dos primeiros desafios na construção de tal sistema é decidir como o LLM será acessado. Essencialmente, existem duas abordagens: a execução do modelo localmente, em infraestrutura própria, ou o consumo via API de um provedor em nuvem, como OpenAI, Google ou Anthropic. A escolha via API é a mais comum, abstraindo a complexidade de hardware e software, com um custo calculado por token. Por outro lado, a execução local oferece maior controle sobre dados e infraestrutura, sendo ideal para aplicações com informações sensíveis ou que exigem baixa latência. Essa decisão fundamental impacta diretamente os custos, o desempenho e a segurança da aplicação.

Visando a flexibilidade e a modularidade, este trabalho adota uma abordagem híbrida, possibilitada pela biblioteca LangChain. Ela atua como uma camada de abstração que permite à aplicação interagir de forma transparente tanto com modelos em nuvem quanto com modelos locais. Para viabilizar a execução local, optou-se pela ferramenta Ollama, que simplifica o processo de servir LLMs de código aberto na própria máquina, expondo-os através de uma API local. Dessa forma, o sistema pode ser facilmente adaptado para diferentes cenários sem alterar sua lógica central.

A orquestração do fluxo de RAG dentro da aplicação é realizada através da LangChain Expression Language (LCEL). Essa linguagem permite a criação de pipelines de processamento de forma declarativa, encadeando componentes através do operador pipe (`()`). A saída de um passo torna-se a entrada do seguinte, criando uma sequência coesa e de fácil leitura. Essa arquitetura não só simplifica a construção de cadeias complexas, como a que integra o LLM a um banco de dados vetorial, mas também oferece vantagens como melhor observabilidade para depuração.

O núcleo da solução foi centralizado na criação de uma classe principal modular, projetada para encapsular todas as funcionalidades de um agente conversacional. Para maximizar sua versatilidade, a operação do sistema é inteiramente controlada por um arquivo de configuração YAML. Através deste arquivo, é possível personalizar parâmetros essenciais, desde a escolha do modelo de LLM e de embeddings até os detalhes técnicos do pré-processamento de documentos, como o tamanho dos chunks e a sobreposição. Essencialmente, o prompt de sistema, que dita a persona e as regras do chatbot, também é tratado como uma configuração central, garantindo que a mesma base de código possa ser reutilizada para diferentes propósitos.

Para complementar a estrutura central, a classe gerencia o ciclo de vida da informação, desde a ingestão de documentos até a orquestração das respostas, garantindo a contextualização do diálogo ao gerenciar o histórico de conversas por usuário. A seleção de ferramentas externas também seguiu o princípio da simplicidade e eficiência. O Telegram foi adotado como interface por sua API robusta, mitigando a complexidade de desenvolver uma solução proprietária. Para o armazenamento vetorial, a escolha foi o ChromaDB, cuja integração nativa com o LangChain e simplicidade operacional eliminaram a necessidade de gerenciar uma infraestrutura de banco de dados mais complexa.

Finalmente, a validação da arquitetura foi realizada através de uma avaliação em três estágios, projetada para testar a flexibilidade da classe e o impacto da abordagem RAG. Embora os testes tenham focado em um domínio específico de programação, o objetivo principal foi gerar métricas de desempenho que comprovassem a eficácia e a natureza genérica da solução proposta, demonstrando sua aplicabilidade em diferentes contextos.

Resultados e Discussões

A fase inicial do projeto concentrou-se em estabelecer uma performance de base utilizando modelos de código aberto. Após uma avaliação qualitativa de diversos LLMs executados localmente via Ollama, que considerou a correção do código, clareza conceitual e aderência às instruções, o modelo gemma2:12b foi selecionado por seu equilíbrio entre geração de código e baixo índice de alucinações. Na sequência, este modelo foi aprimorado com a técnica de RAG, utilizando uma base de conhecimento de materiais didáticos sobre lógica de programação em JavaScript. A integração com RAG resultou em uma notável transformação nas respostas, que se tornaram não apenas mais precisas, mas também significativamente mais simples e didáticas, alinhando-se ao perfil de um assistente de ensino para iniciantes. Este resultado evidenciou que o RAG é eficaz não só para aumentar a factualidade, mas também para moldar o tom e a complexidade da comunicação para um público-alvo específico.

Posteriormente, a arquitetura foi testada com o modelo gemini-1.5-pro através da API do Google, submetendo-o aos mesmos testes. O desempenho foi consistentemente superior ao do modelo local, mesmo este otimizado com RAG. A principal vantagem do gemini-1.5-pro manifestou-se na sua capacidade avançada de gerenciamento de contexto. Em diálogos com múltiplas perguntas encadeadas, o modelo manteve a coesão e a memória das interações anteriores com mais eficácia, proporcionando uma experiência de usuário visivelmente mais fluida e natural.

Os resultados obtidos validam a arquitetura proposta em duas frentes cruciais. Primeiramente, comprovam a eficácia do RAG não apenas para aumentar a acurácia, mas também para especializar o comportamento de um LLM para tarefas específicas, como o ensino. Em segundo lugar, e mais importante, a classe desenvolvida demonstrou sua flexibilidade e

propósito generalista ao permitir alternar facilmente entre um modelo local (gemma2:12b) e um via API (gemini-1.5-pro) sem alterar a lógica de negócio. A solução funciona como uma camada de abstração eficaz, permitindo que a escolha entre a privacidade e o controle de custos dos modelos locais e o desempenho superior dos modelos de ponta via API seja um trade-off estratégico.

Conclusão

Em suma, este trabalho focou em desenvolver e validar uma classe generalista para a criação de chatbots, demonstrando que a arquitetura RAG é crucial não apenas para elevar a acurácia das respostas, mas também para especializá-las para domínios e públicos específicos. A flexibilidade da solução foi comprovada por sua capacidade de operar transparentemente tanto com modelos locais, que priorizam controle e privacidade, quanto com modelos de ponta via API, como o Gemini 1.5 Pro, que oferece uma gestão de contexto superior. Dessa forma, a classe se estabelece como uma fundação prática e modular que acelera o desenvolvimento de chatbots confiáveis, capacitando os desenvolvedores a fazerem escolhas estratégicas de implementação que melhor atendam às necessidades de performance, custo e segurança de cada projeto.

Referências

DAS DORES, Ariana Regina et al. Aplicação da IA na educação: proposta de um projeto ou utilização de chatbot como sistema de tutorial aplicado em um AVA. Revista InovaEduc, n. 7, p. 1-16,

CÓDIGO: ET1614

AUTOR: MARIA CLARA DA SILVA BEZERRA

ORIENTADOR: ALEXSANDRO PEREIRA LIMA

TÍTULO: ZONAS DE HABITABILIDADE CIRCUNSTELARES (ZHCs) - Mundos Super-Habitáveis

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo teórico para a delimitação das Zonas de Habitabilidade Circunstelares (ZHCs), regiões ao redor de estrelas onde as condições são favoráveis para a existência de água líquida e, consequentemente, para a manutenção da vida, tal qual conhecemos. Além disso, o estudo aborda o conceito de Mundos Super-Habitáveis, que são planetas com características ainda mais propícias à vida do que a própria Terra. A metodologia foi baseada no modelo de Gobat & Hong (2016), considerando parâmetros como metalicidade, função de massa inicial (FMI), taxa de formação estelar e impacto de eventos cataclísmicos, como supernovas e núcleos ativos de galáxias (NAGs). Os resultados indicam que estrelas de tipo K apresentam maior potencial para sustentar zonas habitáveis estáveis e duradouras, e que planetas com massas ligeiramente superiores à da Terra oferecem condições mais favoráveis para a manutenção da vida. Também foi analisada a influência de eventos astrofísicos na habitabilidade, reforçando a importância de considerar não apenas fatores estelares, mas também aspectos galácticos.

Palavras-chave: Zonas de Habitabilidade Circunstelares; Mundos Super-Habitáveis;

TITLE: Circumstellar Habitable Zones (CHZs) and the Concept of Super-Habitable Worlds

Abstract

This study presents the development of a theoretical model for the delimitation of Circumstellar Habitable Zones (CHZs), which are regions around stars where conditions are favorable for the existence of liquid water and, consequently, for sustaining life as we know it. In addition, the study explores the concept of Super-Habitable Worlds — planets with characteristics even more conducive to life than Earth itself. The methodology was based on the model proposed by Gobat & Hong (2016), considering parameters such as metallicity, initial mass function (IMF), star formation rate, and the impact of cataclysmic events, such as supernovae and active galactic nuclei (AGNs). The results indicate that K-type stars have a greater potential to sustain stable and long-lasting habitable zones, and that planets with slightly higher masses than Earth offer more favorable conditions for the maintenance of life. The influence of astrophysical events on habitability was also analyzed, reinforcing the importance of considering not only stellar factors but also galactic-scale aspects.

Keywords: Circumstellar Habitable Zones; Super-Habitable Worlds; Exoplanets;

Introdução

A vida na Terra surgiu há bilhões de anos e, desde então, tem prosperado em uma ampla variedade de ambientes, incluindo locais anteriormente considerados inóspitos. No entanto, a manutenção da vida, tal como a conhecemos, depende de condições específicas, como a presença de água no estado líquido, temperaturas moderadas, estabilidade química e baixos níveis de radiação prejudicial. Na busca por compreender como essas condições poderiam se repetir em outros sistemas planetários, surgiu o conceito de Zona de Habitabilidade Circunstelar (ZHC), definida como a região ao redor de uma estrela onde é possível a existência de água líquida na superfície de planetas, condição essencial para a vida. Esse conceito foi inicialmente proposto por Huang (1959) e posteriormente aprimorado por Kasting et al. (1993). A descoberta do primeiro exoplaneta em 1995, orbitando a estrela 51 Pegasi (Mayor & Queloz, 1995), marcou um divisor de águas na astronomia. Desde então, com o avanço das tecnologias de detecção, o número de exoplanetas descobertos tem crescido exponencialmente, ampliando as possibilidades de investigar mundos potencialmente habitáveis. Neste contexto, compreender não apenas onde estão as zonas habitáveis, mas também quais planetas oferecem condições ainda mais favoráveis à vida — os chamados Mundos Super-Habitáveis — tornou-se uma questão central na astrobiologia. Diante do crescente interesse pela astrobiologia e pela busca de vida fora da Terra, compreender os fatores que determinam a habitabilidade de exoplanetas contribui não apenas para avanços na ciência, mas também para reflexões sobre nosso próprio lugar no cosmos. Este trabalho, portanto, busca aprofundar o entendimento dos parâmetros físicos, estelares e galácticos que influenciam a habitabilidade, desenvolvendo um modelo capaz de avaliar a localização e as características dessas zonas em torno de estrelas e sua relação com a evolução da vida no universo.

Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho seguiu uma abordagem teórica baseada no modelo proposto por Gobat e Hong (2016), com o objetivo de construir uma representação simplificada, porém robusta, das Zonas de Habitabilidade Circunstelares (ZHCs). A metodologia adotada considerou dois eixos principais de análise: a formação de planetas telúricos e o impacto de eventos cataclísmicos na habitabilidade desses sistemas. No primeiro eixo, foram analisados parâmetros que influenciam diretamente a formação de planetas rochosos no entorno de diferentes tipos estelares, sendo a metalicidade um dos fatores fundamentais, por sua influência direta na quantidade de elementos pesados disponíveis para a formação de corpos sólidos. Além disso, foram considerados a função de massa inicial (FMI), que define a distribuição de massas estelares em um determinado ambiente, a taxa de formação estelar e a densidade superficial de estrelas na galáxia. Esses parâmetros foram essenciais para determinar as regiões com maior probabilidade de formação de planetas telúricos. No segundo eixo, foi avaliado o impacto de eventos astrofísicos de alta energia, como supernovas dos tipos Ia e II, bem como Núcleos Ativos de Galáxias (NAGs), que podem afetar diretamente a habitabilidade de planetas localizados em suas proximidades. Para isso, foram considerados critérios como a distância crítica necessária para que a emissão de radiação desses eventos seja capaz de esterilizar a superfície de um planeta, além do tempo necessário para a recuperação das condições favoráveis à vida após tais eventos. A partir desses parâmetros, foi elaborado um modelo que permite estimar tanto a localização das ZHCs em função da massa e luminosidade estelar, quanto a influência do ambiente galáctico na manutenção da habitabilidade. Os dados utilizados para validação do modelo foram obtidos a partir de bases públicas, como o catálogo de exoplanetas Exoplanet.eu e dados de missões como Kepler, além de catálogos de supernovas e estudos de densidade estelar da Via

Láctea. As análises e cálculos foram realizados com o auxílio de softwares como Excel, Wolfram Alpha e linguagens de programação como Python, que permitiram processar os dados, gerar gráficos e realizar simulações simplificadas. O modelo desenvolvido, portanto, permite avaliar não apenas a existência de uma ZHC em torno de uma estrela, mas também as condições que tornam essa região efetivamente propícia para a formação e a manutenção da vida, considerando tanto fatores estelares quanto os riscos associados ao ambiente galáctico.

Resultados e Discussões

A partir da implementação do modelo teórico desenvolvido, foi possível determinar a localização das Zonas de Habitabilidade Circunstelares (ZHCs) em torno de diferentes tipos de estrelas, bem como analisar os fatores que contribuem para a existência de Mundos Super-Habitáveis. Inicialmente, a análise dos parâmetros estelares revelou que estrelas do tipo espectral K, conhecidas como anãs laranjas, apresentam as melhores condições para sustentar zonas habitáveis por longos períodos. Essas estrelas possuem uma combinação favorável entre estabilidade, baixa variabilidade na emissão de radiação e uma vida útil significativamente maior do que estrelas do tipo solar, o que favorece o desenvolvimento e a evolução de vida complexa. O modelo indicou que a largura da ZHC está diretamente relacionada à luminosidade da estrela, sendo mais estreita em estrelas de baixa massa e mais ampla em estrelas mais massivas. No entanto, estrelas muito massivas possuem ciclos de vida curtos, inviabilizando o desenvolvimento de vida complexa, enquanto estrelas muito pequenas, como as anãs vermelhas, apresentam riscos associados à intensa atividade magnética e emissão de radiação. Dessa forma, as estrelas de tipo K representam um equilíbrio ideal, oferecendo zonas habitáveis relativamente largas e estabilidade por dezenas de bilhões de anos. Em relação às características dos planetas, os resultados apontam que mundos com massas entre 1 e 2 vezes a massa da Terra são mais propensos a manter atmosferas densas e estáveis, além de apresentarem maior atividade geológica, essencial para ciclos bioquímicos como o ciclo do carbono, que regula o clima planetário. Planetas com essas características possuem, portanto, maior potencial de habitabilidade do que a própria Terra, especialmente quando localizados em órbitas quase circulares dentro das ZHCs. O estudo também revelou que fatores externos, como a ocorrência de supernovas e a presença de Núcleos Ativos de Galáxias (NAGs), exercem influência significativa sobre a habitabilidade em escala galáctica. As simulações demonstraram que uma supernova tipo II pode afetar negativamente planetas localizados até aproximadamente 30 a 50 parsecs de distância, causando danos severos à atmosfera e aos ecossistemas. Supernovas do tipo Ia, por sua vez, apresentam potencial de destruição em escalas ainda maiores, dependendo da energia liberada. Já os NAGs, embora sejam fenômenos mais raros em galáxias como a Via Láctea, possuem um alcance destrutivo considerável, especialmente nas regiões mais próximas ao centro galáctico. A partir dessas análises, confirmou-se a validade do conceito de Zona Habitável Galáctica (ZHG), sendo as regiões intermediárias da galáxia, como a localização atual do Sistema Solar, as mais favoráveis à existência de vida, devido ao menor risco de eventos catastróficos e à disponibilidade de elementos pesados necessários para a formação de planetas rochosos. De forma geral, os resultados obtidos reforçam que a habitabilidade é um conceito que depende não apenas das condições locais no entorno de uma estrela, mas também do ambiente galáctico como um todo. A combinação de uma estrela estável, a presença de planetas de características físicas favoráveis e a localização em regiões seguras da galáxia são fundamentais para o surgimento e a manutenção da vida. Por fim, embora o modelo apresente simplificações e não contemple aspectos específicos como dinâmica atmosférica, geoquímica detalhada ou interações gravitacionais complexas, os resultados

estão em consonância com estudos recentes da astrobiologia e da exoplanetologia, oferecendo uma base sólida para pesquisas futuras sobre habitabilidade e busca por vida no universo.

Figura 1: Evolução da fração da galáxia habitável ao longo do tempo cósmico (Fonte: Gobat & Hong, 2016) Este gráfico ilustra como a fração da galáxia com condições favoráveis à vida evolui com o tempo cósmico, fundamentando a ideia de que a habitabilidade varia ao longo da história da galáxia. Figura 2: Mapa da Zona Habitável Galáctica (ZHG) para estrelas M e FGK (Fonte: Spitoni, Matteucci & Sozzetti, 2014) Este mapa demonstra a distribuição espacial das zonas habitáveis na galáxia, destacando regiões com maior potencial para a formação de planetas capazes de abrigar vida, considerando a composição química e a presença de poeira. Figura 3: Gráficos sobre taxas de supernovas e impacto em habitabilidade (Fonte: Cappellaro et al., 2015) Este gráfico apresenta a frequência dos principais tipos de supernovas que podem afetar a habitabilidade planetária por meio de eventos cataclísmicos, ressaltando a importância desse fator na avaliação da sobrevivência da vida em diferentes regiões.

Conclusão

O presente trabalho permitiu desenvolver um modelo simplificado, porém eficaz, para a delimitação das Zonas de Habitabilidade Circunstelares (ZHCs) e a análise das condições que favorecem o surgimento dos chamados Mundos Super-Habitáveis. Os resultados indicam que estrelas do tipo K, devido à sua estabilidade e longevidade, oferecem ambientes mais propícios para o desenvolvimento e a manutenção da vida, especialmente quando seus planetas apresentam massas entre uma e duas vezes a da Terra. Além disso, a influência de eventos cataclísmicos, como supernovas e Núcleos Ativos de Galáxias, destaca a importância da localização galáctica para a habitabilidade, confirmando a existência da Zona Habitável Galáctica (ZHG) como uma região com condições otimizadas para o surgimento e a continuidade da vida. Embora o modelo apresente limitações inerentes à sua simplificação e à escassez de dados detalhados sobre alguns fenômenos astrofísicos, ele serve como uma base sólida para futuras pesquisas e aprimoramentos. Com o avanço das tecnologias observacionais e o aumento do conhecimento sobre exoplanetas e seus ambientes, será possível refinar ainda mais as estimativas de habitabilidade e direcionar esforços para a descoberta de mundos verdadeiramente habitáveis. Assim, o estudo contribui para o campo da astrobiologia e da exoplanetologia, ampliando a compreensão dos fatores que determinam a possibilidade de vida no universo, um tema de relevância científica e filosófica fundamental.

Referências

ABBOT, D. S.; COWAN, N. B.; CIESLA, F. J. Indication of sensitivity of planetary weathering behavior and habitable zone to surface land fraction. *The Astrophysical Journal*, v. 756, 2012. ABBOT, D. S.; SWITZER, E. R. The steppenwolf: a proposal for a habitable planet in interstellar space. *The Astrophysical Journal Letters*, v. 735, 2011. ATREYA, S. et al. *Origin and Evolution of Planetary and Satellite Atmospheres*. Tucson: University of Arizona Press, 1989. BEECH, M. The past, present and future supernova threat to Earth's biosphere. *Astrophysics and Space Science*, v. 336, 2011. CAPPELLARO, E. et al. Supernova rates from the SUDARE VST-OmegaCAM search. I. Rates per unit volume. *Astronomy & Astrophysics*, v. 584, p. 62, 2015. GOBAT, R.; HONG, S. E. Evolution of Galaxy Habitability. *Astronomy & Astrophysics*, v. 592, A96, 2016. GONZALEZ, G.;

BROWNLEE, D.; WARD, P. The Galactic Habitable Zone Galactic Chemical Evolution. Icarus, v. 152, 2001. HAKOBYAN, A. A. et al. Supernovae and their host galaxies – II. The relative frequencies of supernovae types in spirals. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 444, p. 2428, 2014. HUANG, S. -S. The problem of life in the universe and the mode of star formation. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v. 71, p. 421, 1959. KASTING, J.; WHITMIRE, D.; REYNOLDS, R. Habitable Zones around Main Sequence Stars. Icarus, v. 101, p. 108, 1993. MAYOR, M.; QUELOZ, D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. Nature, 1995. PRANTZOS, N. On the "Galactic Habitable Zone" . Space Science Reviews, v. 135, 2008. SPITONI, E.; MATTEUCCI, F.; SOZZETTI, A. Galactic habitable zone around M and FGK stars with chemical evolution models that include dust. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 440, p. 2588, 2014. WRIGHT, J. T. et al. The Frequency of Hot Jupiters Orbiting nearby Solar-type Stars. The Astrophysical Journal, v. 753, 2012

Anexos

Figura 1: Evolução da fração da galáxia habitável ao longo do tempo cósmico (Fonte: Gobat & Hong, 2016)

Figura 2: Mapa da Zona Habitável Galáctica (ZHG) para estrelas M e FGK (Fonte: Spitoni, Matteucci & Sozzetti, 2014)

Figura 3: Gráficos sobre taxas de supernovas e impacto em habitabilidade (Fonte: Cappellaro et al., 2015)

CÓDIGO: ET1640

AUTOR: FILIPE FERNANDES CAMPOS

ORIENTADOR: LEO GOUVEA MEDEIROS

TÍTULO: Ondas gravitacionais em modelos de gravitação de ordem superior

Resumo

O objetivo deste relatório é detalhar as atividades de Iniciação Científica realizadas durante o ano relacionada ao plano de trabalho “Ondas gravitacionais em modelos de gravitação de ordem superior”. Nesse semestre, foi realizado um breve estudo sobre ondas gravitacionais em um contexto não relativístico, bem como uma análise dos métodos atuais de interferometria para a detecção dessas perturbações e de suas principais limitações, sobretudo no que diz respeito ao estudo de ruídos transientes (glitches), consequência direta do alto nível de sensibilidade necessário para tais observações. Ademais, o trabalho se dedica em grande parte ao upgrade e à manutenção do cluster de computadores da Escola de Ciência e Tecnologia (ECT) da UFRN, peça fundamental para o direcionamento desses estudos, com cerca de 80% de seu poder computacional reservado a atividades realizadas pelo observatório de ondas gravitacionais Virgo.

Palavras-chave: Ondas gravitacionais, Glitches, Cluster de computadores, Virgo

TITLE: Gravitational waves in higher-order gravitation models

Abstract

The objective of this report is to detail the Scientific Initiation activities carried out during the year, related to the research plan “Gravitational waves in higher-order gravitation models”. During this semester, a brief study was conducted on gravitational waves in a non-relativistic context, along with an analysis of current interferometric methods for detecting such perturbations and their main limitations, particularly concerning the study of transient noise (glitches), which arise as a direct consequence of the extreme sensitivity required for these observations. In addition, much of the work has been devoted to the upgrade and maintenance of the computer cluster at the School of Science and Technology (ECT) of UFRN, a fundamental resource for carrying out these studies, with approximately 80% of its computational power allocated to activities developed by the Virgo gravitational wave observatory.

Keywords: Gravitational waves, Glitches, Computer cluster, Virgo

Introdução

Em 1915, Albert Einstein publicou uma das maiores revoluções na física: a Teoria da Relatividade Geral. Diferentemente do que previa Newton, Einstein descreveu a gravidade como uma deformação na geometria do espaço-tempo, em vez de uma força atuando entre corpos em um espaço rígido. Essa explicação mudou a forma como enxergamos o universo e trouxe soluções plausíveis para fenômenos até então pouco compreendidos.

Como consequência direta dessa teoria, surgiu a previsão das ondas gravitacionais, até então inéditas. De acordo com os postulados da Relatividade Restrita, nada pode propagar-se mais rápido que a luz — princípio que também se aplica à gravidade. Nesse contexto, a gravidade deixa de ser tratada como força de ação instantânea e passa a ser entendida como perturbações no espaço-tempo, propagando-se como ondas transversais à velocidade da luz. [1]

Em 2015, o Observatório LIGO realizou a detecção pioneira de radiação gravitacional. Denominado GW150914 (Figura 1), esse evento marcou o início de uma nova era para a astronomia: um século após sua previsão, as ondas gravitacionais puderam ser estudadas diretamente. Tal fenômeno foi gerado pela coalescência de um sistema binário de buracos negros, que perderam energia orbital pela emissão intensa de radiação gravitacional, dissipando uma fração significativa da energia do sistema.[2]

Por trás da detecção de eventos como o GW150914 está uma tecnologia de interferometria capaz de registrar variações gravitacionais de baixíssima amplitude. Apesar de serem extremamente energéticos, os sinais gerados pela coalescência de sistemas binários massivos a milhares de anos-luz, quando observados, possuem amplitude de onda da ordem de 10^{-21} m. Para comparação, o tamanho de um núcleo atômico é $\sim 10^{-15}$ m, o que torna a detecção dessas perturbações uma tarefa que exige enorme sensibilidade.[3]

Para descrever ondas gravitacionais propagando-se em um espaço-tempo oscilante, necessitamos de duas coordenadas generalizadas, isto é, dois graus de liberdade, que no contexto da Relatividade Geral correspondem aos modos de polarização. Esses modos são representados por h_+ , que pode ser interpretado como oscilações nos eixos norte-sul e leste-oeste, e $h_\times$, associado às oscilações nos eixos nordeste-sudoeste e noroeste-sudeste.[4]

Além disso, sabe-se que a Teoria da Relatividade Geral não é uma teoria completa, e a comunidade científica investiga atualmente teorias de gravitação de ordem superior, as quais sugerem a possível existência de modos adicionais de polarização.[5] O estudo das ondas gravitacionais é, portanto, um dos meios mais promissores para testar tais teorias alternativas e investigar novos graus de liberdade gravitacionais.[6]

Devido à enorme precisão necessária para detectar tais oscilações — recorde-se que as medições são frações do tamanho de um núcleo atômico —, esses detectores sofrem interferências de fontes não gravitacionais, como flutuações na corrente elétrica, variações de temperatura e movimentações da crosta terrestre. Essas detecções indesejadas recebem o nome de ruídos transientes ou glitches.[7] A ocorrência de glitches é inevitável, e podem interferir com medições de ondas gravitacionais (Figura 2). Por isso, grande parte dos esforços atuais está voltada ao seu estudo, de forma a compreender melhor como mitigá-los. [8]

A análise desses fenômenos implica no processamento de grandes volumes de dados, cuja complexidade demanda capacidade computacional em larga escala. Nesse contexto, a utilização de recursos de supercomputação, em especial clusters de alto desempenho, torna-se indispensável. Esses sistemas unem a potência de máquinas menos robustas para obter processamento capaz de realizar tarefas intensas como as pesquisas aqui tratadas. Esse é o caso do cluster da Escola de Ciência e Tecnologia da UFRN, um dos principais objetos de estudo desta iniciação científica.

Metodologia

Visto que o escopo deste plano de trabalho é um projeto longo e complexo voltado ao estudo de ondas gravitacionais, surgiu a necessidade de lidar com os glitches, o que demandou o desenvolvimento da infraestrutura computacional. Nos últimos seis meses, iniciamos esse processo pela reestruturação do cluster de computadores, com o intuito de viabilizar pesquisas em gravitação da forma mais eficiente possível, permitindo maior flexibilidade e resultados de melhor qualidade.

Assim, grande parte dos esforços realizados durante este semestre letivo concentrou-se no cluster da ECT. Vale destacar que fui incluído no projeto de IC no semestre 2025.1, assumindo o trabalho em andamento e dedicando-me integralmente a essas atividades, que são não apenas essenciais para a continuidade do plano de trabalho, mas também importantes para o desenvolvimento científico da UFRN.

Entre as metodologias empregadas no estudo de glitches, destaca-se o uso de aprendizado de máquina para sua classificação. Em termos gerais, o aprendizado de máquina (AM) desenvolve algoritmos e modelos estatísticos capazes de identificar padrões em dados sem instruções explícitas. Diferentemente de algoritmos tradicionais, que seguem uma sequência fixa de passos, o AM aprende automaticamente as relações entre entrada e saída a partir de exemplos. Esse aprendizado pode ser ajustado para melhorar progressivamente o desempenho do modelo, tornando-o capaz de realizar classificações mais precisas.[9][10]

No aprendizado de máquina, destacam-se duas áreas principais: o aprendizado supervisionado e o não supervisionado.

No aprendizado supervisionado, as saídas do problema são bem definidas e o conjunto de dados inicial contém labels (rótulos) que indicam a classe de cada elemento. Assim, o algoritmo aprende a associar atributos a classes, tornando-se capaz de classificar corretamente novos dados não rotulados.[11]

No aprendizado não supervisionado, os dados não possuem classificação prévia. O algoritmo busca autonomamente padrões e similaridades, agrupando-os em conjuntos semelhantes, em um processo conhecido como clusterização.[12]

No escopo gravitacional, quando um glitch é detectado, diversas informações podem ser extraídas, como tempo, frequência, SNR e amplitude. Para maior compreensão, pode-se consultar o material disponibilizado pelo GWOSC, acessível em Python pela biblioteca gwpy. Além disso, o espectrograma fornece pistas importantes para a identificação do tipo de glitch.[13]

Um exemplo de ferramenta voltada para a detecção e classificação de glitches é o Gravity Spy, disponível na plataforma Zooniverse.[14] Essa plataforma reúne um vasto banco de espectrogramas representando diferentes sinais e conta com a colaboração de voluntários humanos para sua classificação. No entanto, a classificação manual não é suficiente, pois computadores são mais adequados para lidar com o grande volume de dados gerados. Por isso, o LIGO utiliza os dados do Gravity Spy para treinar algoritmos de aprendizado de máquina que automatizam esse processo.[15]

Para viabilizar a execução de tais algoritmos, é necessária uma capacidade computacional imensa, alcançável apenas com supercomputadores. Um dos principais meios utilizados são os clusters de computadores, sistemas em que múltiplas máquinas operam de forma integrada como um único sistema. Em geral, um cluster é formado por hardwares independentes, cada

um com sua própria memória e processamento, que se comunicam por rede local (LAN). Cada hardware é denominado nó, sendo comum a existência de um nó central responsável pela coordenação.[16]

A grande vantagem do uso de clusters é possibilitar computação de alto desempenho (HPC – High Performance Computing) a partir de hardware relativamente acessível. Assim, mesmo que os processadores individuais de cada nó não sejam os mais potentes, a execução paralela de tarefas permite reduzir consideravelmente o tempo de processamento de aplicações complexas.

Nesse contexto, uma das principais atividades desta IC foi a restauração do cluster de computadores da Escola de Ciência e Tecnologia da UFRN (ECT). Esse cluster, adquirido em 2014, possuía software desatualizado e pouco otimizado. Assim, ao longo deste semestre, foi conduzida uma reestruturação completa do software, acompanhada de ajustes de hardware, com o objetivo de torná-lo novamente operacional e direcionar sua capacidade ao estudo de glitches e ondas gravitacionais, em colaboração com o observatório Virgo.

O cluster de computação da ECT segue o modelo Beowulf e é composto por 24 nós, sendo um deles o servidor e os outros 23 nós de cálculo (Figura 3). Sua arquitetura é a seguinte:

1 Servidor (Intel Xeon) contendo:

- 2× CPUs Intel Xeon Hexacore BX80621E52620 2.0 GHz (12 núcleos físicos)
- Placa-mãe Intel DBS2400SC
- 64 GB de memória Kingston ECC (4×16 GB)
- 4 × HDs Seagate Enterprise de 1 TB (operação 24/7)
- 1 Fonte de alimentação – certificação 80 Plus

23 Nós de Cálculo com:

- CPU Intel i7 3770 3.4 GHz
- Placa-mãe Intel DH77EB
- 32 GB de memória Kingston (4×8 GB)
- Fonte de alimentação – certificação 80 Plus

cada.

Vale destacar que, neste cluster, o armazenamento é inteiramente concentrado no servidor (o nó cabeça), e os nós se conectam e se comunicam entre si por meio de cabos de ethernet conectados em um switch central.

No total, o cluster disponibiliza 104 núcleos físicos (208 threads) e 800 GB de RAM.

Além disso, alguns ajustes foram realizados em nível de hardware, com a instalação de 8 novas fontes de alimentação 500W Plus Gold em determinados nós, substituindo as antigas fontes 80 Plus. Foram trocadas também as baterias CMOS de cada nó.

A seguir, na parte de resultados e discussão, segue o passo a passo da reestruturação da parte de software do cluster de computadores.

Resultados e Discussões

Dado o estado precário da performance de software, o armazenamento foi completamente formatado e a instalação do sistema operacional foi feita do zero, utilizando agora o Debian 12 “Bookworm” com Linux 6.1.129-1.[17] O processo de instalação envolveu a configuração manual de rede para definir os IPs físicos e o DNS, além do particionamento por RAID via software. RAID significa (Redundant Array of Independent Disks) e consiste em um método de organização de armazenamento que permite adicionar redundância de dados contra falha ou a combinação da capacidade de dois discos diferentes.[18]

Existem diversos tipos de RAID, os principais são:

RAID 0: Permite que dados sejam separados igualmente entre unidades de armazenamento distintas. Não oferece redundância, se um HD falhar, os dados podem ser perdidos.

RAID 1: Espelha os dados de um disco para outros. Se um deles falhar, os dados estão salvos em outras unidades.

RAID 5: Dados são divididos entre 3 ou mais unidades de armazenamento. Informações para a reconstrução dos dados em caso de falha são distribuídas de forma que se um disco falhe, os dados não sejam perdidos.[19]

Dessa forma, o armazenamento do cluster foi dividido da seguinte forma:

```
hpcproteu@hpc:~$ lsblk
```

```
NAME MAJ:MIN RM SIZE RO TYPE MOUNTPOINTS
```

```
sda 8:0 0 931.5G 0 disk
```

```
|—sda1 8:1 0 953M 0 part \[SWAP]
```

```
|—sda2 8:2 0 93.1G 0 part
```

```
|  └─md0 9:0 0 93.1G 0 raid1 /
```

```
|—sda3 8:3 0 1K 0 part
```

```
└─sda5 8:5 0 837.4G 0 part
```

```
└─md1 9:1 0 1.6T 0 raid5 /home
```

```
sdb 8:16 0 931.5G 0 disk
```

```
|—sdb1 8:17 0 953M 0 part \[SWAP]
```

```
|—sdb2 8:18 0 93.1G 0 part
```

```
| └─md0 9:0 0 93.1G 0 raid1 /  
└─sdb3 8:19 0 1K 0 part  
└─sdb5 8:21 0 837.4G 0 part  
└─md1 9:1 0 1.6T 0 raid5 /home  
sdc 8:32 0 931.5G 0 disk  
└─sdc1 8:33 0 931.5G 0 part /backup  
sdd 8:48 0 931.5G 0 disk  
└─sdd1 8:49 0 953M 0 part /boot  
└─sdd2 8:50 0 93.1G 0 part  
| └─md0 9:0 0 93.1G 0 raid1 /  
└─sdd3 8:51 0 1K 0 part  
└─sdd5 8:53 0 837.4G 0 part  
└─md1 9:1 0 1.6T 0 raid5 /home
```

Ou seja: 93,1 GB reservados para o sistema de arquivos raiz, configurado em RAID 1 para permitir que o sistema operacional inicialize mesmo em caso de falha de um dos discos; 837,4 GB em RAID 5 distribuídos entre três dos quatro discos rígidos, totalizando 1,6 TB para a partição /home dos usuários; um disco rígido dedicado com 931,5 GB para backups; e o espaço de armazenamento residual alocado como memória SWAP.

O cluster utiliza o Warewulf v4, um kit de ferramentas para gerenciamento de sistemas operacionais projetado para clusters de HPC, como gerenciador de nós. Ele fornece uma interface eficiente para adicionar, remover ou editar nós, além de oferecer uma solução escalável e flexível para o provisionamento e gerenciamento de recursos de computação.[20]

O gerenciamento e a submissão de tarefas são realizados pelo Slurm (Simple Linux Utility for Resource Management), um sistema de gerenciamento de clusters e agendamento de tarefas para clusters Linux, de código aberto, tolerante a falhas e altamente escalável.[21] O cluster foi configurado com uma única partição, e a utilização dos nós pelos usuários é controlada por grupos com acesso total (100%) ou parcial (20%). Além disso, foi implementado um sistema de prioridade para a execução de tarefas.

O cluster hospeda um servidor SSH, que funciona como principal meio de acesso dos usuários, disponível 24/7 no endereço proteu.ufrn.ect.br, na porta 2222.

Após uma instalação limpa do sistema operacional, a configuração dos nós exigiu várias etapas, que estão detalhadas a seguir.

Primeiramente, logado como administrador, o endereço MAC e o IP local de cada nó foram adicionados ao arquivo 'dhcpd_conf', localizado em '/etc/dhcp/':

===INÍCIO CÓDIGO===

```
host prtnode01 {  
hardware ethernet 70:54:d2:1a:6c:9e;  
fixed-address 192.168.200.101;  
option host-name "prtnode01";  
}  
  
host prtnode02 {  
hardware ethernet 70:54:d2:1a:63:b8;  
fixed-address 192.168.200.102;  
option host-name "prtnode02";  
}  
  
...
```

===FIM CÓDIGO===

Em seguida, os endereços IP e os nomes de host de cada nó foram adicionados ao arquivo ‘/etc/hosts’:

===INÍCIO CÓDIGO===

```
# The following lines are desirable for IPv6 capable hosts
```

```
::1 localhost ip6-localhost ip6-loopback
```

```
ff02::1 ip6-allnodes
```

```
ff02::2 ip6-allrouters
```

```
# Do not edit after this line
```

```
# This block is autogenerated by warewulf
```

```
# Warewulf Server
```

```
192.168.200.1 hpc.proteu warewulf
```

```
# Warewulf Nodes
```

```
192.168.200.101 prtnode01
```

```
192.168.200.102 prtnode02
```

```
...
```

===FIM CÓDIGO===

Uma vez configurado o arquivo 'hosts', os nós foram registrados no Warewulf fornecendo seus endereços MAC e IP e habilitando a descoberta pela rede, por meio dos seguintes comandos:

===INÍCIO CÓDIGO===

```
sudo wwctl node add prt.node01 --ipaddr 192.168.200.101
```

```
sudo wwctl node set prt.node01 --discoverable
```

```
sudo wwctl node set prt.node01 --hwaddr 70:54:d2:1a:6c:9e
```

===FIM CÓDIGO===

Como adicionar cada nó manualmente é uma tarefa repetitiva, o procedimento foi automatizado com o uso do seguinte script, otimizando o processo de configuração:

===INÍCIO CÓDIGO===

```
#!/bin/bash
```

```
# Caminho para dhcpd.conf
```

```
DHCPD_CONF="/etc/dhcp/dhcpd.conf"
```

```
# Lê o arquivo linha por linha
```

```
while read -r line; do
```

```
# Checa se a linha contém um host e não está comentada
```

```
if [[ $line =~ ^host\ ([a-zA-Z0-9_-]+) ]]; then
```

```
NODE_NAME=${BASH_REMATCH[1]}
```

```
fi
```

```
# Captura o IP
```

```
if [[ $line =~ fixed-address[[:space:]]+([0-9.]+) ]]; then
```

```
IPADDR=${BASH_REMATCH[1]}
```

```
fi
```

```
# Captura o endereço MAC
```

```
if [[ $line =~ hardware\ ethernet[[:space:]]+([a-fA-F0-9:]+) ]]; then
```

```
HWADDR=${BASH_REMATCH[1]}
```

```
fi
```

```
# Ao final de cada bloco do host, gera os comandos
```

```
if [[ $line == *"}*" && ! -z $NODE_NAME && ! -z $IPADDR && ! -z $HWADDR ]];  
then  
  
echo "sudo wwctl node add $NODE_NAME --ipaddr $IPADDR"  
  
echo "sudo wwctl node set $NODE_NAME --discoverable"  
  
echo "sudo wwctl node set $NODE_NAME --hwaddr $HWADDR"  
  
echo ""  
  
\# Limpa as variáveis para prosseguir  
  
NODE_NAME=""  
  
IPADDR=""  
  
HWADDR=""  
  
fi  
  
# Ignora as linhas comentadas  
  
done < <(grep -v '^#' "$DHCPD_CONF")  
  
===FIM CÓDIGO===
```

A etapa seguinte consistiu em gerar os overlays por meio do comando “sudo wwctl overlay build” e verificar sua consistência com sudo “wwctl node list -a”.

Uma vez que o Warewulf foi devidamente configurado, os nós de computação foram incorporados ao arquivo de configuração do Slurm (/etc/slurm/slurm.conf), seguidos pela definição da partição computacional:

```
===INÍCIO CÓDIGO===  
  
# COMPUTE NODES  
  
NodeName=prtnode01 RealMemory=31000 Sockets=1 CoresPerSocket=4  
State=UNKNOWN  
  
...  
  
NodeName=prtnode23 RealMemory=31000 Sockets=1 CoresPerSocket=4  
State=UNKNOWN  
  
PartitionName=poligono Nodes=prtnode[01-23] Default=YES MaxTime=INFINITE  
State=UP DefMemPerCPU=3000 MaxMemPerNode=30000  
  
===FIM CÓDIGO===
```

Para que os nós fossem detectados pelo host, foi necessário configurar as imagens de nós. Uma imagem de nó consiste em um sistema operacional padronizado que o servidor fornece aos nós do cluster, permitindo que todos executem de forma idêntica e sincronizada, sem a

necessidade de instalar e configurar cada máquina individualmente, até porque as unidades de armazenamento estão localizadas apenas no servidor.

Esse procedimento foi realizado acessando a imagem do contêiner com o comando “sudo wwctl container shell --bind /:/mnt HPC-debian-v0”, o que possibilitou a transferência do arquivo de configuração do Slurm do host para cada nó por meio do comando:

```
“cp /mnt/etc/slurm/slurm.conf /etc/slurm/slurm.conf”.
```

Após garantir que os serviços ‘munge’ e ‘slurmd’ estavam em execução adequada, saímos da imagem e aguardamos sua regeneração antes de atualizar o overlay.

A etapa final consistiu em reiniciar os serviços essenciais no host:

```
===INÍCIO CÓDIGO===
```

```
sudo systemctl restart warewulfd.service
```

```
sudo systemctl restart isc-dhcp-server.service
```

```
sudo systemctl restart tftpd-hpa.service
```

```
sudo systemctl restart nfs-server.service
```

```
sudo systemctl restart munge.service
```

```
sudo systemctl restart slurmd.service
```

```
===FIM CÓDIGO===
```

Por fim, cada nó foi reiniciado individualmente e validado para confirmar que todos os serviços estavam ativos e que o relógio do sistema estava corretamente sincronizado, evitando assim possíveis erros de execução. Essa verificação foi realizada por meio de acesso remoto via SSH:

```
===INÍCIO CÓDIGO===
```

```
ssh root@prtnode01 -p 2222
```

```
reboot
```

```
systemctl status munge
```

```
systemctl status slurmd
```

```
===FIM CÓDIGO===
```

Assim, com o cluster configurado, torna-se possível a criação de contas e início das pesquisas relacionadas, que a esse ponto já estão sendo executadas.

Conclusão

Com o cluster de computadores em pleno funcionamento, torna-se possível realizar as pesquisas planejadas. Como já mencionado, 80% de sua capacidade computacional está reservada para a colaboração Virgo, além de se constituir em uma excelente ferramenta para professores e alunos da UFRN que desejem desenvolver suas próprias pesquisas. Em um futuro próximo, esse hardware poderá fornecer resultados relevantes para o avanço científico na área da gravitação, possivelmente incluindo progressos significativos no estudo de teorias de gravitação de ordem superior e de suas polarizações associadas.

O objetivo, daqui em diante, é dar sequência ao plano de trabalho com um grupo de pesquisa composto não apenas por alunos de iniciação científica, mas também por estudantes de pós-graduação, de modo a utilizar efetivamente as ferramentas computacionais disponibilizadas pelos esforços realizados durante esta primeira metade de 2025, e assim contemplar todos os objetivos inicialmente planejados por esse estudo.

Referências

- [1] N. L. N. S. Nascimento e R. R. Cuzinatto, Ondas gravitacionais de buracos negros coalescentes: um estudo quantitativo a partir de física básica, Rev. Bras. Ens. Fis. 44, 20220004, 2022.
- [2] The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration, Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)
- [3] N. L. N. S. Nascimento e R. R. Cuzinatto, Ondas gravitacionais de buracos negros coalescentes: um estudo quantitativo a partir de física básica, Rev. Bras. Ens. Fis. 44, 20220004, 2022.
- [4] *Ibidem*.
- [5] Alves, Matheus F. S., et al. “Gravitational Waves Emission in Quadratic Gravity: Longitudinal Modes, Angular Momentum Emission, and Positivity of the Radiated Power.” Physical Review D, vol. 111, no. 8, Apr. 2025, p. 084055. American Physical Society, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.084055>.
- [6] Alves, Matheus F. S., Luís F. M. A. M. Reis, and L. G. Medeiros. “Gravitational Waves from Inspiring Black Holes in Quadratic Gravity.” Physical Review D, vol. 107, no. 4, Feb. 2023, p. 044017. American Physical Society, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.044017>.
- [7] T. A. Ferreira. “APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING NO ESTUDO DE TRANSIENTES DOS DETECTORES ADVANCED LIGO”. 9 de Dezembro, 2022. Disponível em: <http://mtc-m21d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/01.02.20.29/doc/publicacao.pdf>.
- [8] LIGO Caltech. “LIGO Technology”. Acessado 31 de Agosto, 2025. Disponível em: <https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-technology>.
- [9] AWS. “O que é Machine Learning”. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/what-is/machine-learning/>. Acessado 31 de Agosto, 2025.
- [10] Gareth James, Daniela Witten, Trevor Hastie, Robert Tibshirani e Jonathan Taylor. “An Introduction to Statistical Learning with Applications in Python”. Springer Cham. 2023.

[11] AWS. “O que é Machine Learning”. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/what-is/machine-learning/>. Acessado 31 de Agosto, 2025.

[12] Gareth James, Daniela Witten, Trevor Hastie, Robert Tibshirani e Jonathan Taylor. “An Introduction to Statistical Learning with Applications in Python”. Springer Cham. 2023.

[13] GWOSC. “GW Open Science Center”. Acessado 31 de Agosto, 2025. Disponível em: <https://gwosc.org/>.

[14] Zooniverse. “Gravity Spy | Zooniverse”. Acessado 31 de Agosto, 2025. Disponível em: <https://www.zooniverse.org/projects/zooniverse/gravity-spy>.

[15] Zooniverse. “Research | Gravity Spy | Zooniverse”. Acessado 31 de Agosto, 2025. Disponível em: <https://www.zooniverse.org/projects/zooniverse/gravity-spy/about/research>.

[16] IBM. “What is Cluster Computing?”. Acessado 31 de Agosto, 2025. Disponível em: <https://www.ibm.com/think/topics/cluster-computing>.

[17] Debian. “Informações de lançamento do Debian ‘bookworm’”. Acessado 31 de Agosto, 2025. Disponível em: <https://www.debian.org/releases/bookworm/>.

[18] Geeks for Geeks. “RAID (Redundant Arrays of Independent Disks)”. Acessado 31 de Agosto, 2025. Disponível em: <https://www.geeksforgeeks.org/dbms/raid-redundant-arrays-of-independent-disks/>.

[19] *Ibidem*.

[20] Warewulf. “Home | Warewulf”. Acessado 31 de Agosto, 2025. Disponível em: <https://warewulf.org/>.

[21] SchedMD. “Slurm Workload Manager - Documentation”. Acessado 31 de Agosto, 2025. Disponível em: <https://slurm.schedmd.com/documentation.html>.

Anexos

Figura 1 - Espectrograma referente a detecção GW150419

Figura 2 - Exemplo de uma detecção de onda gravitacional (GW170817) contaminada por um glitch

Figura 3 - Foto do cluster de computadores do ECT

CÓDIGO: ET1657

AUTOR: JOSÉ IGO SOARES CAMILO

ORIENTADOR: MARCELO BORGES NOGUEIRA

TÍTULO: Implementação de SLAM Visual para robôs de baixo custo

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e análise de módulos básicos de SLAM visual em robôs móveis de baixo custo, focando em Odometria Visual (VO) e Odometria de Rodas (WO). A VO permite estimar a pose e mapear parcialmente o ambiente a partir de informações visuais, enquanto a WO fornece medições mecânicas das rodas. O estudo destaca como esses módulos podem ser estendidos: a VO pode evoluir para um sistema VSLAM, e a integração com a WO pode formar uma abordagem híbrida similar a um VISLAM, oferecendo maior precisão e robustez em navegação móvel.

Palavras-chave: Odometria Visual, Odometria de Rodas, VSLAM, VISLAM

TITLE: Implementation of Visual SLAM for Low-Cost Robots

Abstract

This work presents the development and analysis of basic visual SLAM modules for low-cost mobile robots, focusing on Visual Odometry (VO) and Wheel Odometry (WO). VO allows estimating the robot's pose and partially mapping the environment using visual information, while WO provides mechanical measurements from the wheels. The study highlights how these modules can be extended: VO can evolve into a VSLAM system, and integration with WO can form a hybrid approach similar to VISLAM, offering improved accuracy and robustness in mobile navigation.

Keywords: Visual Odometry, Wheel Odometry, VSLAM, VISLAM

Introdução

O Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) é uma técnica fundamental que permite a um dispositivo móvel ou robô se localizar e mapear simultaneamente um ambiente desconhecido em tempo real. O SLAM desempenha um papel vital em diversas áreas, como robótica móvel, realidade aumentada e navegação autônoma, permitindo que os dispositivos entendam e interajam com o ambiente ao seu redor.

Existem diferentes variantes do SLAM, podendo ser destacados o Visual Simultaneous Localization and Mapping (VSLAM) e o Visual-Inertial Simultaneous Localization and Mapping (VISLAM). O VSLAM utiliza câmeras para extrair informações visuais do ambiente para estimar a posição e orientação do dispositivo em tempo real. O VISLAM combina informações obtidas visualmente com dados inerciais obtidos por meio de sensores como: acelerômetros, giroscópios ou Inertial Measurement Unit (IMU). O Visual SLAM também envolve a criação e atualização de um mapa 3D do ambiente conforme o dispositivo

se move. Ele registra a posição das características visuais em relação ao mapa, permitindo que o dispositivo localize-se e mapeie simultaneamente novas áreas desconhecidas.

Essas variantes do SLAM têm suas próprias vantagens e desafios. O VSLAM é adequado quando as informações visuais são suficientes e a precisão do movimento é de grande importância. Já o VISLAM é mais robusto em situações em que as informações visuais podem ser limitadas ou imprecisas, como em ambientes com poucas características distintivas ou em movimentos rápidos.

Este plano de trabalho se concentra em tarefas específicas, abordando os conceitos e usos dos métodos mencionados, integrando-os em plataformas robóticas de baixo custo desenvolvidas em trabalhos anteriores.

Metodologia

Para a validação do sistema proposto, foram conduzidos experimentos utilizando tanto datasets públicos amplamente empregados na literatura quanto dados coletados a partir do robô real em ambiente controlado. Dessa forma, foi possível avaliar o desempenho do método em diferentes cenários: um mais complexo e dinâmico, com forte presença de tráfego e iluminação variável, e outro mais estruturado e estável, representativo do uso prático no robô.

A primeira etapa consistiu na implementação da odometria visual (VO) utilizando pontos ORB para detecção e extração de características em imagens monoculares. As correspondências entre essas características foram utilizadas para estimar o movimento incremental do robô. A fim de aumentar a consistência da trajetória estimada, foi aplicada a seleção de keyframes, reduzindo redundâncias e instabilidades na reconstrução.

Em paralelo, o sistema de marcos visuais ArUco foi integrado ao robô como referência adicional para localização. Essa integração permitiu comparar diretamente a estimativa da odometria visual com a odometria de rodas (WO) e, assim, analisar o potencial da VO como substituta ou fonte complementar aos encoders em diferentes condições de operação.

Para o processo de otimização das trajetórias, foi utilizado o framework GTSAM, que se baseia em factor graphs. Nesse modelo, as poses do robô e os landmarks são representados como variáveis, enquanto as restrições de odometria visual e relações entre keyframes são expressas como fatores. O problema foi formulado como um mínimos quadrados não lineares, solucionado por métodos iterativos, o que permitiu reduzir o erro acumulado (drift) e obter estimativas mais consistentes.

Complementarmente, foram conduzidos estudos sobre Registro de Imagens (uso de homografias), envolvendo detecção e extração de features, correspondência entre imagens e estimativa da transformação geométrica. Essas análises foram realizadas com Python e a biblioteca OpenCV, permitindo comparar o desempenho e a facilidade de implementação de diferentes estratégias de identificação de landmarks.

Por fim, o sistema foi integrado ao robô equipado com a ESP32-CAM, possibilitando a captura das imagens, a extração das características relevantes e o envio dos dados para um servidor remoto via protocolo MQTT. Essa etapa permitiu validar o fluxo completo de aquisição, processamento e transmissão de dados em operação real.

Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados obtidos na estimativa da pose de um robô móvel planar. Foram realizados experimentos utilizando tanto dados de um dataset público quanto dados capturados de um robô real em ambiente controlado. O objetivo principal foi comparar o desempenho da Odometria Visual (VO) e da Odometria de Rodas (WO) em relação à trajetória de referência (ground truth).

Nos testes com o dataset, a WO apresentou desempenho levemente superior ao da VO, com menores erros absolutos e relativos. Esse resultado pode ser explicado pelas boas condições de navegação e baixo deslizamento do veículo utilizado no conjunto de dados, o que favorece a consistência das estimativas de rodas. Já a VO mostrou-se mais sensível a variações de iluminação e elementos dinâmicos no ambiente, apresentando erros mais acentuados.

No teste com o robô real, a VO apresentou resultados próximos aos da WO, mesmo utilizando uma câmera de menor resolução. O desempenho mais equilibrado nesse caso se deve ao ambiente estruturado e menos dinâmico, que favoreceu a extração de características visuais estáveis.

Por fim, destaca-se que, embora tenha sido implementada a modelagem do problema por meio do framework GTSAM, não houve efetiva fusão entre VO e WO. Assim, os resultados correspondem às estimativas isoladas de cada método, sem ganhos adicionais de consistência que poderiam ser obtidos com a integração das fontes de informação.

Conclusão

Os resultados mostraram que a Odometria Visual (VO) pode alcançar desempenho comparável ao da Odometria de Rodas (WO), com a vantagem de capturar movimentos mais complexos e reconstruir parcialmente a estrutura do ambiente, possibilitando técnicas como Bundle Adjustment e detecção de loop closures.

Entretanto, a VO apresenta limitações em condições de baixa textura, iluminação variável e movimentos puramente rotacionais, enquanto a WO é mais estável em ambientes controlados. No presente trabalho, as estimativas foram analisadas separadamente, sem fusão entre VO e WO.

Trabalhos futuros incluem a integração de VO e WO, o uso de sensores inerciais (IMU) e a implementação de loop closures mais sofisticados para aumentar a precisão e a robustez da estimativa de pose.

Referências

NISTER, D.; NARODITSKY, O.; BERGEN, J. Visual Odometry. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004., v. 1, p. I-I, 2004. DOI: 10.1109/CVPR.2004.1315094.

MUR-ARTAL, R.; MONTIEL, J. M. M.; TARDÓS, J. D. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 31, n. 5, p. 1147-1163, 2015. DOI: 10.1109/TRO.2015.2463671.

CAMPOS, C.; ELVIRA, R.; RODRÍGUEZ, J. J. G.; MONTIEL, J. M.; TARDÓS, J. D. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial, and Multimap SLAM. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 37, n. 6, p. 1874-1890, 2021. DOI: 10.1109/TRO.2021.3075644.

JEONG, J.; CHO, Y.; SHIN, Y.-S.; ROH, H.; KIM, A. Complex Urban Dataset with Multi-level Sensors from Highly Diverse Urban Environments. *International Journal of Robotics Research*, v. 38, n. 6, p. 642-657, 2019.

PIRES, A. G. Localização cooperativa e descentralizada em enxames robóticos. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2015.

CARVALHO, M. E. C. de. Mapeamento 3D e Localização de Robôs Móveis utilizando Sensor LiDAR. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024.

ULLAH, I.; ADHIKARI, D.; KHAN, H.; ANWAR, M. S.; AHMAD, S.; BAI, X. Mobile robot localization: Current challenges and future prospective. *Computer Science Review*, v. 53, 100651, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2024.100651>.

DOURADO, C. M. J. M. et al. A new approach for mobile robot localization based on an online IoT system. *Future Generation Computer Systems*, v. 100, p. 859-881, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.05.074>.

SILVA, B. M. F. Odometria Visual Baseada em Técnicas de Structure from Motion. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2011.

YAHYAEI, M.; SEIFERT, G.; HEMPEN, T.; HUBER, W. Review of exteroceptive sensors for autonomous driving. 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), p. 4005-4010, 2022. DOI: 10.1109/ITSC55140.2022.9922379.

POULOSE, A.; BAEK, M.; HAN, D. S. Point Cloud Map Generation and Localization for Autonomous Vehicles Using 3D LiDAR Scans. 2022 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC), p. 336-341, 2022. DOI: 10.1109/APCC55198.2022.9943630.

YAMAZAKI, K.; TOMONO, M.; TSUBOUCHI, T.; YUTA, S. 3-D object modeling by a camera equipped on a mobile robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004. Proceedings. ICRA '04, v. 2, p. 1399-1405, 2004. DOI: 10.1109/ROBOT.2004.1308020.

LINS, F. C. A.; ROSA, N. S.; GRASSI, V.; MEDEIROS, A. A. D.; ALSINA, P. J. DPO: Direct Planar Odometry with Stereo Camera. *Sensors*, v. 23, n. 3, art. 1393, 2023. DOI: 10.3390/s23031393.

YOUSIF, K.; BAB-HADIASHAR, A.; HOSEINNEZHAD, R. An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM: Applications to Mobile Robotics. *Intelligent Industrial Systems*, v. 1, p. 289-311, dez. 2015. DOI: 10.1007/s40903-015-0032-7.

SCARAMUZZA, D.; FRAUNDORFER, F. Visual Odometry [Tutorial]. IEEE Robotics & Automation Magazine, v. 18, n. 4, p. 80-92, 2011. DOI: 10.1109/MRA.2011.943233.

FRAUNDORFER, F.; SCARAMUZZA, D. Visual Odometry: Part II: Matching, Robustness, Optimization, and Applications. IEEE Robotics & Automation Magazine, v. 19, n. 2, p. 78-90, 2012. DOI: 10.1109/MRA.2012.2182810.

GAREAU, D. B. Visual-Inertial Odometry for 3D Pose Estimation and Scene Reconstruction using Unmanned Aerial Vehicles. 2019. Dissertação (Mestrado) – University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2019.

ZHENG, F.; LIU, Y.-H. Visual-Odometric Localization and Mapping for Ground Vehicles Using SE(2)-XYZ Constraints. 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), p. 3556-3562, 2019. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793928.

ZHAN, H.; WEERASEKERA, C. S.; BIAN, J.-W.; REID, I. Visual Odometry Revisited: What Should Be Learnt? 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), p. 4203-4210, 2020. DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9197374.

HE, M.; ZHU, C.; HUANG, Q.; CHEN, Z.; LIU, H. A review of Monocular Visual Odometry. The Visual Computer, v. 36, p. 1053-1065, 2020. DOI: 10.1007/s00371-019-01714-6.

NEYESTANI, A. et al. Survey and Research Challenges in Monocular Visual Odometry. 2023 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEnv), p. 107-112, 2023. DOI: 10.1109/MetroLivEnv56897.2023.10164057.

MOHAMED, S. A. S. et al. A Survey on Odometry for Autonomous Navigation Systems. IEEE Access, v. 7, p. 97466-97486, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2929133.

QIN, T.; LI, P.; SHEN, S. VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator. IEEE Transactions on Robotics, v. 34, n. 4, p. 1004-1020, 2018. DOI: 10.1109/TRO.2018.2853729.

QIN, T.; SHEN, S. Online Temporal Calibration for Monocular Visual-Inertial Systems. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), p. 3662-3669, 2018.

CÓDIGO: ET1664

AUTOR: EVELY RYANNE COELHO DE ALBUQUERQUE

COAUTOR: JUSSARA CÂMARA CARDOZO

ORIENTADOR: ELISAMA VIEIRA DOS SANTOS

TÍTULO: Síntese e Caracterização de Heteroestruturas de $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Mo}$ para Aplicações Fotocatalíticas

Resumo

A busca por tecnologias sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de semicondutores aplicados à fotocatalise, voltados à degradação de poluentes orgânicos e ao aproveitamento da energia solar. Neste trabalho, heteroestruturas de Nb_2O_5 modificadas com molibdênio foram sintetizadas pelo método Pechini para aprimorar suas propriedades estruturais, ópticas e fotoeletroquímicas. As caracterizações por DRX, MEV/EDS, FTIR e UV-Vis/DRS indicaram que a dopagem com 10% de Mo reduziu o band-gap de 3,09 eV para 2,92 eV, deslocando a absorção para a região do visível. As análises morfológicas mostraram partículas mais homogêneas e melhor dispersão do dopante, favorecendo a separação de cargas fotoinduzidas. Esses resultados evidenciam que a modificação com molibdênio aumenta a eficiência fotocatalítica do Nb_2O_5 , reduz a recombinação de pares elétron-lacuna e consolida o material como alternativa promissora para aplicações ambientais e de conversão de energia solar. Em especial no tratamento de efluentes da indústria têxtil, cujos corantes e compostos orgânicos recalcitrantes representam um desafio crítico para a sustentabilidade e a preservação dos recursos hídricos, atendendo desta forma algumas objetivos de desenvolvimento sustentável estabelecidas pela ONU como água potável e saneamento e energia limpa e acessível.

Palavras-chave: Fotocatálise; Nb_2O_5 Molibdênio; Heteroestruturas

TITLE: Synthesis and Characterization of $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Mo}$ Heterostructures for Photocatalytic Applications

Abstract

The search for sustainable technologies has driven the development of semiconductors applied to photocatalysis, aimed at the degradation of organic pollutants and the utilization of solar energy. In this work, Nb_2O_5 heterostructures modified with molybdenum were synthesized using the Pechini method to enhance their structural, optical, and photoelectrochemical properties. Characterizations by XRD, SEM/EDS, FTIR, and UV-Vis/DRS indicated that doping with 10% Mo reduced

the band-gap from 3.09 eV to 2.92 eV, shifting absorption toward the visible region. Morphological analyses revealed more homogeneous particles and better dopant dispersion, favoring the separation of photoinduced charge carriers. These results demonstrate that molybdenum modification increases the photocatalytic efficiency of Nb₂O₅, reduces electron–hole recombination, and establishes the material as a promising alternative for environmental applications and solar energy conversion. In particular, it shows great potential for the treatment of textile industry effluents, whose dyes and recalcitrant organic compounds represent a critical challenge for sustainability and the preservation of water resources, thus contributing to several United Nations Sustainable Development Goals, such as clean water and sanitation, and affordable and clean energy.

Keywords: Photocatalysis; Nb₂O₅; Molybdenum; Heterostructures

Introdução

A economia circular e o desenvolvimento sustentável estão diretamente relacionados, uma vez que ambas enfatizam o uso consciente dos recursos naturais e a busca por alternativas tecnológicas inovadoras. Essa integração não apenas contribui para a redução de impactos ambientais, mas também fortalece modelos econômicos mais duradouros e adaptáveis às exigências globais de sustentabilidade (LAMBA; KUMAR; DHIR, 2024; BAKAN et al., 2022). Diante do agravamento dos problemas ambientais e do avanço da consciência coletiva, observa-se que instituições de pesquisa e setores produtivos têm se empenhado em adotar estratégias alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Dentro desse contexto, a fotocatalise tem ganhado grande destaque nos últimos anos, em razão de sua elevada eficiência na oxidação de compostos orgânicos, especialmente no tratamento de efluentes da indústria têxtil, marcados por corantes e substâncias orgânicas recalcitrantes que dificultam a remoção convencional e comprometem a qualidade dos recursos hídricos. Desta forma, diversos semicondutores vêm sendo aplicados nesse processo, como TiO₂ (QUILUMBAQUIN et al., 2024; ADAMOPOULOS et al., 2019), ZnO (UMASHANKAR et al., 2023), SnO₂ (DAIDECHE et al., 2023), entre outros. Contudo, materiais semicondutores isolados ainda enfrentam limitações, como baixa absorção da luz solar e recombinação acelerada de pares elétron/lacuna, o que compromete sua eficiência (ALULEMA-PULLUPAXI et al., 2021). Para superar essas barreiras, a utilização de compósitos semicondutores tem sido investigada como alternativa promissora. Entre eles, destacam-se os óxidos de nióbio, que apresentam propriedades eletrônicas e estruturais favoráveis à síntese de nanomateriais aplicados à foto-oxidação e à conversão de compostos orgânicos. Esses materiais podem ser empregados tanto de forma isolada quanto combinados a outros semicondutores, além de serem frequentemente modificados com nanopartículas metálicas. Tal modificação constitui uma estratégia eficiente para aumentar a absorção de luz visível e favorecer a separação dos portadores de carga foto gerados, resultando em significativo ganho de desempenho fotocatalítico. (SU et al., 2021; RUIYI; XIAOYUE; ZAIJUN, 2024; ROMEIRO et al., 2025). Nos últimos anos heteroestruturas baseadas em Nb₂O₅ têm apresentado resultados expressivos na degradação de poluentes orgânicos sob iluminação visível, especialmente quando associadas a semicondutores como TiO₂ e ZnO (RUIYI; XIAOYUE; ZAIJUN, 2024).

Além disso, nanopartículas metálicas como as de molibdênio apresentam propriedades eletrônicas peculiares: em escala nanométrica, atuam como reservatórios de elétrons foto excitados, favorecendo sua captura e armazenamento temporário. Esse mecanismo é essencial para prolongar a vida útil dos portadores de carga e reduzir a taxa de recombinação, o que aumenta a eficiência do processo fotocatalítico (UMASHANKAR et al., 2023). A elevada condutividade elétrica dessas nanopartículas de MO promove uma transferência eficiente de elétrons, reduzindo a recombinação de pares elétron-lacuna (e^-/h^+) e aumentando a duração dos portadores de carga (ZIASHAHABI et al., 2019). Isso indica que a incorporação dessas nanopartículas em materiais fotocatalíticos pode aprimorar significativamente processos como a degradação de poluentes orgânicos e a conversão da energia solar em energia química. Nesse contexto, o presente estudo visa a síntese de heteroestruturas Nb_2O_5/Mo por meio do método Pechini, seguida de caracterizações de superfícies fotoeletroquímicas e fotocatalíticas. Os materiais Nb_2O_5 e Nb_2O_5/Mo foram investigados por difração de raios X em pó (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de dispersão de energia (EDS), espectroscopia de infravermelho (FTIR) e caracterizações ópticas e fotoeletroquímicas utilizando UV-Vis/DRS, com o objetivo de elucidar sua estrutura cristalina, propriedades ópticas, morfologia e comportamento fotoativo.

Metodologia

Os reagentes empregados neste estudo, etilenoglicol ($C_2H_6O_2$), ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) e álcool isopropílico (C_3H_8O), foram adquiridos da Sigma-Aldrich (Brasil). O oxalato amoniacal de nióbio ($NH_4H_2[NbO(C_2O_4)_3] \cdot H_2O$) foi fornecido pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (Brasil). Todos os reagentes apresentavam grau analítico e foram utilizados sem qualquer processamento adicional.

O Nb_2O_5 foi preparado pela metodologia de Pechini, conforme descrito no fluxograma da (Figura 1) adicionando-se 2,16 g de ácido cítrico a 20 mL de água destilada a 50 °C. Após a completa dissolução do ácido cítrico, foram adicionados 3,08 g de ($NH_4H_2[NbO(C_2O_4)_3] \cdot H_2O$), mantendo-se a solução a 50 °C por 30 minutos. Em seguida, foram adicionados 7,0 g de etilenoglicol, elevando-se a temperatura para 70 °C, com agitação constante da solução por mais 30 minutos. A solução foi então transferida para uma mufla, iniciando-se em temperatura ambiente, sendo mantida a 600 °C por 2 horas para obtenção da estrutura ortorrômbica ($T-Nb_2O_5$). Após a remoção do forno, o material foi moído.

Para a decoração de nanopartículas de Mo na estrutura $T-Nb_2O_5$, foram utilizadas quantidades selecionadas de Na_2MoO_4 (10%) (Figura 2). Posteriormente, 0,5 g de Nb_2O_5 foi dissolvido em 20 mL de etanol e 0,03 g de ácido tânico, e a solução foi transferida para uma mufla a 200 °C por 14 horas. Compósitos de Nb_2O_5/Mo foram preparados com as quantidades desejadas (10%) de Mo.

A estrutura cristalina dos materiais sintetizados foi analisada utilizando um difratômetro de raios X Bruker D2Phaser, equipado com um detector Lynxeye e radiação de cobre (Cu K, $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$), com filtro de níquel, corrente de 10 mA e voltagem de 30 kV. Os padrões de DRX foram obtidos na faixa de valores de 2 θ

entre 10–80°, fenda divergente de 0,6 mm, fenda central de 1 mm, passo de 0,01° e tempo de aquisição de 0,3 s.

A morfologia e a composição química dos materiais foram estudadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV; Carl Zeiss, Auriga, Oberkochen, Alemanha) e análise por espectroscopia de dispersão de energia, realizada com um microscópio eletrônico de varredura (EDS, Bruker, detector XFlash, Billerica, MA, EUA).

Resultados e Discussões

A micrografia obtida por MEV para a amostra Nb₂O₅/Mo (10%) (Figura 3 c) evidencia a formação de partículas com morfologia irregular e tendência à aglomeração, característica comum de materiais sintetizados pelo método de Pechini. Observa-se, entretanto, que a distribuição das partículas apresenta certa homogeneidade, com dimensões reduzidas em escala nanométrica, o que contribui para o aumento da área superficial do material. Esse aspecto é de grande relevância para aplicações fotocatalíticas, uma vez que áreas superficiais maiores favorecem a adsorção de moléculas e, conseqüentemente, a eficiência das reações de degradação. A análise por EDS (Figura 3 d) confirmou a presença de nióbio e oxigênio como elementos majoritários, além do sinal característico do molibdênio, evidenciando o sucesso da dopagem. O mapeamento elementar demonstrou uma boa dispersão do Mo na matriz de Nb₂O₅, sem sinais de segregação em regiões específicas. Essa incorporação homogênea do dopante é essencial, pois reduz a formação de centros de recombinação e contribui para a separação mais eficiente dos portadores de carga.

Os difratogramas apresentados na Figura 4 permitem identificar a estrutura cristalina do Nb₂O₅ puro e da heteroestrutura Nb₂O₅/Mo. No padrão de Nb₂O₅ puro (linha preta), observa-se uma série de picos bem definidos em $2\theta \approx 22,5^\circ$, $28,5^\circ$, $36,7^\circ$ e $55,3^\circ$ correspondem à fase ortorrômbica (T-Nb₂O₅), de acordo com o padrão JCPDS nº 30-0873. Indicando uma fase cristalina e estável em condições atmosféricas e amplamente descrita como ativa em processos fotocatalíticos. Esses picos correspondem aos planos cristalinos característicos do óxido de nióbio, confirmando a pureza da fase sintetizada. Na heteroestrutura Nb₂O₅/Mo (linha vermelha), nota-se que os picos correspondentes ao Nb₂O₅ permanecem presentes, mas algumas intensidades são alteradas e aparecem picos adicionais de baixa intensidade. Essa mudança sugere que a incorporação de Mo na estrutura de Nb₂O₅ não altera significativamente a estrutura cristalina principal do óxido de nióbio, mas pode induzir pequenas distorções ou gerar fases secundárias em quantidades reduzidas. A ausência de picos intensos correspondentes a MoO_x indica que a quantidade de molibdênio é baixa (10%) e que ele está provavelmente bem disperso na matriz de Nb₂O₅. Essa interação é benéfica para aplicações fotocatalíticas, uma vez que a presença de nanopartículas metálicas tende a atuar como centros de captura de elétrons, promovendo a separação eficiente dos pares elétron/lacuna (e⁻/h⁺). Portanto, a análise DRX confirma a formação da heteroestrutura Nb₂O₅/Mo, mantendo a integridade cristalina do Nb₂O₅, ao mesmo

tempo em que a introdução de Mo modifica levemente a intensidade dos picos, sugerindo interações estruturais entre os dois óxidos.

Os espectros de FTIR apresentados na Figura 5 confirmam a presença das ligações características da estrutura do Nb_2O_5 . Bandas intensas são observadas na região entre $600\text{--}900\text{ cm}^{-1}$, atribuídas às vibrações de estiramento Nb–O–Nb, típicas da rede octaédrica do óxido de nióbio. Na amostra $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{:}10\%\text{Mo}$, observa-se um leve deslocamento dessas bandas, o que indica distorções estruturais induzidas pela presença do dopante. Além disso, uma nova contribuição em torno de 1100 cm^{-1} pode ser associada a vibrações Mo–O, sugerindo que o molibdênio foi efetivamente incorporado na rede cristalina. Outro ponto relevante é a presença de bandas residuais em torno de $1600\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$, que podem estar relacionadas a grupos –OH de água adsorvida ou hidroxilas superficiais. Essas espécies são importantes em processos fotocatalíticos, pois podem atuar como sítios ativos para a geração de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), desempenhando papel central na degradação de poluentes orgânicos.

A Figura 6 apresenta os espectros de absorção óptica obtidos por reflectância difusa (DRS), juntamente com a análise da energia de band-gap pelo modelo de Tauc. O Nb_2O_5 puro apresenta borda de absorção próxima a 400 nm, correspondente a um band-gap de aproximadamente 3,09 eV, típico de semicondutores de larga banda proibida, ativos principalmente sob radiação UV. Após a modificação com 10% de Mo, observa-se um deslocamento da borda de absorção para a região do visível, resultando em redução do band-gap para cerca de 2,92 eV. Esse estreitamento é consistente com a introdução de níveis eletrônicos adicionais pelo dopante, que favorecem transições eletrônicas com menor energia. Como consequência, o material torna-se mais eficiente na absorção da luz visível, aspecto fundamental para aplicações ambientais baseadas em energia solar.

Conclusão

A síntese das heteroestruturas $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Mo}$ pelo método Pechini demonstrou resultados significativos no aprimoramento das propriedades estruturais, ópticas e fotoeletroquímicas do Nb_2O_5 . As análises realizadas confirmaram que a dopagem com 10% de Mo promoveu maior homogeneidade morfológica, redução do band-gap e deslocamento da absorção para a região do visível, além de favorecer a separação eficiente dos pares elétron-lacuna. Esses fatores contribuem diretamente para o aumento da eficiência fotocatalítica do material, consolidando o $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Mo}$ como uma alternativa promissora em processos de degradação de poluentes orgânicos e na conversão de energia solar. Assim, este estudo reforça o potencial das heteroestruturas à base de nióbio modificadas com metais de transição como estratégia eficaz para superar limitações de semicondutores isolados e viabilizar tecnologias sustentáveis em aplicações ambientais e energéticas.

Referências

- B. Bakan , N. Bernet, T. Bouchez, R. Boutrou , JM Choubert , P. Dabert , C. Duquennoi , V. Ferraro, D. Garcia-Bernet, S. Gillot , Organic Residues and Wastewater : Research Challenges . Waste and Biomass Valorization , Hal 13 (2022) 1267–1267. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01549-0>.
- HK Lamba, NS Kumar, S. Dhir , Circular economy and sustainable development: a review and research agenda, International Journal of Productivity and Performance Management 73 (2024) 497–522. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2022-0314>.
- W. Quilumbaquin , GX Castillo-Cabrera, LJ Borrero -González, JR Mora, V. Valle, A. Debut, LD Loor-Urgilés , PJ Espinoza-Montero, Photoelectrocatalytic degradation of high- density polyethylene microplastics on TiO₂-modified boron-doped diamond photoanode , IScience 27 (2024) 109192. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2024.109192>.
- P. M. Adamopoulos , I. Papagiannis , D. Raptis , P. Lianos , Photoelectrocatalytic hydrogen production using a TiO₂/WO₃ bilayer photocatalyst in the presence of ethanol as a fuel , Catalysts 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/catal9120976>.
- R. Umashankar , S. Harshitha Devi, K. Gurushantha , SO Manjunatha , M. Al-Dossari , G. Shobha , KJ Rudresh Kumar, MR Suresh Kumar, K. Keshavamurthy , NS Abd EL- Gawaad , A. Madhu , S. Satyanarayana Reddy , N. Srinatha , Improved photocatalytic, antimicrobial and photoelectrochemical properties of nanocrystalline Cu²⁺ -doped ZnO nanoparticles , Ceram Int 49 (2023) 22449–22459. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.077>.
- A. Ziashahabi , M. Prato, Z. Dang , R. Poursalehi , N. Naseri , The effect of silver oxidation on the photocatalytic activity of Ag/ ZnO hybrid plasmonic / metal-oxide nanostructures under visible light and in the dark , Sci Rep 9 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48075-7>.
- K. Daideche , H. Lahmar , D. Lerari , A. Azizi , Influence of deposition potential on the electrochemical growth and photocatalysis performance of SnO₂ nanostructures , Inorg Chem Commun 147 (2023) 110154. <https://doi.org/10.1016/J.INOCHE.2022.110154>.
- P. Alulema-Pullupaxi , PJ Espinoza-Montero, C. Sigcha-Pallo , R. Vargas, L. Fernández, JM Peralta-Hernández, JL Paz, Fundamentals and applications of photoelectrocatalysis as an efficient process to remove pollutants from water: A review, Chemosphere 281 (2021) 130821. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130821>.
- K. Su , H. Liu, Z. Gao, P. Fornasiero , F. Wang, Nb₂O₅-Based Photocatalysts , Advanced Science 8 (2021) 1–25. <https://doi.org/10.1002/adv.202003156>.
- L. Ruiyi , L. Xiaoyue , L. Zaijun , Nb₂O₅-graphene heterojunction composite with ultrahigh photocatalytic activity for solar light driven photodegradation of ciprofloxacin , J Photochem Photobiol A Chem 446 (2024) 115188. <https://doi.org/10.1016/J.JPHOTOCHEM.2023.115188>.

F. da C. Romeiro, JAL Perini, MVB Zanoni, MO Orlandi, Structural and optical investigation of Nb₅₊-doped Sn₃O₄ for photoelectrochemical hydrogen production, Journal of Physics and Chemistry of Solids 196 (2025) 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2024.112334>.

G. Taques Tractz, F. Staciaki da Luz, S. Regina Masetto Antunes, E. Banczek do Prado, M. Taras da Cunha, P. Rogério Pinto Rodrigues, Nb₂O₅ synthesis and characterization by Pechini method to the application as electron transport material in a solar device, Solar Energy 216 (2021) 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.029>.

U. Khanum, M. K. Shabbir, Q. ul ain Shaikh, J. Akhtar, A. Fatima, M. Kazi, M. Arshad, M. Irshad, KH Thebo, Tailoring the graphene framework by embedding Nb₂O₅ and silver nanoparticles for electrodes in energy storage applications, J Mol Struct 1309 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138250>.

Anexos

Figura 1. Fluxograma da síntese de Nb₂O₅

Figura 2. fluxograma da Síntese das Heterojunções Nb₂O₅ /Mo

Figura 3. Imagens de MEV e análise por EDS para Nb₂O₅:10%Mo (c, d)

Figura 3. Imagens de MEV e análise por EDS para Nb₂O₅:10%Mo (c, d)

Figura 4. Padrões de DRX de Nb₂O₅ e da heteroestrutura Nb₂O₅/Mo

Figura 5. Espectros de FTIR para Nb₂O₅ e Nb₂O₅:10%Mo

Figura 6. Determinação da energia de band-gap a partir da função de Kubelka-Munk e do modelo de Tauc. Gráfico dos espectros de absorção UV–vis DRS de Nb₂O₅ (em preto) e Nb₂O₅:10%Mo (em vermelho)

CÓDIGO: ET1672

AUTOR: AMÁLIA MATIAS ALVES DE SOUZA RIBEIRO

COAUTOR: JOÃO VICTOR FERREIRA LACERDA AIRES

ORIENTADOR: LEONARDO ANDRADE DE ALMEIDA

TÍTULO: Busca por exoplanetas ao redor do sistema binário evoluído NY Vir

Resumo

O estudo das variações do período orbital de sistemas binários evoluídos é fundamental para o entendimento de vários fenômenos físicos, como: perda de momento angular por emissão de ondas gravitacionais e ejeção de matéria, movimento apsidal, troca de matéria entre as componentes do sistema, mecanismo Applegate, além de detecção de terceiros corpos acoplados gravitacionalmente à binária. Neste contexto, analisamos o sistema NY VIR, que é binária do tipo HW Vir, composto por uma estrela do tipo sdB e uma anã M, com período orbital de $\sim 0,1$ dia. Para buscar possíveis variações no período orbital, usamos o programa de Wilson-Devinney para medir os instantes dos eclipses primários nos dados do satélite TESS para os setores 23, 46, 50 e 91, com cadências de 120, 20, 20 e 20s, respectivamente. Adicionando nossas medidas aos dados da literatura, ajustamos aos instantes dos eclipses uma efeméride linear a fim de identificar variações no período orbital do sistema usando o seu diagrama observado menos calculado (O-C). Neste diagrama nota-se uma variação complexa com um termo periódico e um segundo sinal quadrático. Interpretamos este resultado com base no efeito tempo-luz (ETL), relacionado com a variação do período orbital em um sistema binário eclipsante devido a interação gravitacional com corpos externos. Em nossa análise, a solução mais plausível para explicar as variações é a presença de dois corpos circumbinários, corroborando com os resultados da literatura para o sistema.

Palavras-chave: Sistemas binários. Exoplanetas. NY Vir

TITLE: SEARCH FOR EXOPLANETS AROUND THE EVOLVED BINARY SYSTEM
NY VIR

Abstract

Studying orbital period variations in evolved binary systems plays a crucial role in understanding several physical phenomena, including angular momentum loss through gravitational wave emission and mass ejection, apsidal motion, mass transfer between system components, Applegate mechanism, and detection of gravitationally bound third bodies. In this study, we focus on the NY VIR system—an HW Vir-type binary consisting of an sdB star and an M dwarf—with an orbital period of approximately 0.1 days. To investigate possible variations in its orbital period, we measured the primary eclipse timings using TESS satellite data from sectors 23, 46, 50, and 91, with cadences of 120, 20, 20, and 20 seconds, respectively. We employed the Wilson-Devinney code to carry out these measurements. By combining our results with previously published data, we fitted a linear ephemeris to the eclipse timings and constructed the system's observed-minus-calculated (O-C) diagram to detect orbital period variations. This diagram reveals a complex variation that includes both a

periodic component and a quadratic trend. We interpret these findings through the light-travel time effect (LTTE), which causes orbital period variations in binary systems. Our analysis suggests two circumbinary bodies most likely account for the observed variations, supporting earlier reports in literature of the system.

Keywords: Binary system. Exoplanetas. NY Vir

Introdução

Sistemas estelares com duas estrelas orbitando um centro de massa comum, são denominados de sistemas binários e representam fontes essenciais para a compreensão da formação e evolução estelar no Universo. Sistemas com estas configurações também podem abrigar exoplanetas. Dois exemplos são os exoplanetas PSR B1620-26 b [1] e Kepler-16 b [2], ambos orbitando as duas estrelas dos respectivos sistemas sendo, portanto, denominados de exoplanetas circumbinários. Desta forma, o estudo de sistemas binários também é uma fonte relevante para os estudos de formação planetária.

Um dos tipos mais importantes de sistemas binários são aqueles denominados de binárias eclipsantes. Estas binárias se destacam por realizarem eclipses das componentes em relação a linha de visada do observador. Os eclipses fornecem informações relevantes acerca das propriedades físicas e orbitais das componentes do sistema como, por exemplo, a massa, raio e temperatura das componentes, bem como determinar seu período orbital. Uma vez que determinamos os instantes em que os eclipses ocorrem, podemos verificar ainda a existência de corpos externos ligados gravitacionalmente ao sistema binário, bem como caracterizá-los.

Dentre as possíveis configurações de sistemas binários, tomamos como destaque aqueles do tipo HW Vir (ver [3]) para uma revisão acerca destes sistemas). Tais sistemas são caracterizados por serem binárias evoluídas, compostas por uma estrela quente e compacta (chamada de primária) e uma estrela de baixa massa da sequência principal (chamada de secundária), orbitando o centro de massa comum com um período orbital curto. A melhor hipótese de formação destes sistemas se dá através da evolução mais rápida da primária, que inicia um processo instável de transferência de massa entre as componentes. Este processo culmina no surgimento de um envoltório de matéria comum as duas estrelas que é ejetado quando a secundária passa a espiralar em direção a primária [4, 5, 6], de modo que a configuração final do sistema depende da razão entre as massas e separação das componentes [7].

O sistema binário eclipsante NY Vir, descoberto por [8], é constituído de uma estrela sub-anã no tipo B (sdB, chamada de primária) e uma anã marrom (chamada de secundária) sendo, portanto, classificado como do tipo HW Vir. Este sistema apresenta variações significativas dos instantes em que os eclipses primários (quando a secundária passa entre a primária e nossa linha de visada) ocorrem, podendo indicar a existência de fenômenos internos ao sistema, bem como a possibilidade de existirem corpos externos interagindo gravitacionalmente com o sistema [9, 10, 11].

Neste trabalho, testamos a hipótese de existência de exoplanetas circumbinários (PCBs) ao redor do sistema binário NY Vir, sob a luz dos novos dados fotométricos do setor 91 do telescópio espacial TESS e do efeito tempo-luz (ETL), no qual um perturbador externo ao sistema binário eclipsante gera variações nos instantes de eclipse. Também realizamos a análise da evolução orbital do sistema, em busca de verificar sua estabilidade.

Metodologia

Durante a fase de coleta de dados, inicialmente foi feita uma busca na literatura por instantes de eclipses do sistema binário NY Vir e, uma vez que tais instantes foram obtidos, acessamos remotamente, via Python através da biblioteca Lightkurve [12] a base de dados Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST), onde os dados fotométricos obtidos pelo TESS estão armazenados. Coletamos as curvas de luz obtidas através do pipeline de processamento do Science Processing Operations Center (SPOC) [13] dos setores 23, 46, 50 e 91, com cadências respectivas de 120, 20, 20 e 20s, obtendo, então, a maior quantidade de dados disponíveis para cada setor.

Com as curvas de luz obtidas pelo TESS já obtidas, utilizamos o código FitWDMCMC, elaborado pelo Prof. Dr. Leonardo Andrade de Almeida [14], para ajustar um modelo para todos os eclipses primários da respectiva curva de luz. Para encontrar o instante de mínimo, utiliza-se o código de modelagem Wilson-Devinney (WD) [15], conjuntamente com o método de Monte Carlo com Cadeia de Markov (do inglês: Markov Chain Monte Carlo, MCMC), baseado no algoritmo Metropolis-Hastings (M-H), utilizando-se de um critério de convergência baseado na minimização do chi-quadrado.

Uma vez que os instantes de mínimo dos eclipses primários foram obtidos, fazemos o ajuste da efeméride linear e subtraímos estes valores computados dos valores de instante de mínimo dos eclipses primários observados. Este procedimento resulta no diagrama O-C (observado menos “computado”) mostrado na Figura 1, que nos mostra que existem outros fenômenos atrasando e adiantando os eclipses.

Utilizando-se do diagrama O-C, testamos a hipótese de existência de PCBs modelando o ETL considerando dois PCBs, que é a atual proposta mais aceita na literatura [11, 16]. Para isso, utilizamos o MCMC através da biblioteca emcee [17] com o passo Stretch Move [18], utilizando, novamente, a minimização do chi-quadrado como método de convergência. Para os ajustes, foram utilizados 24 walkers com 5000 steps, resultando em 120000 interações. Removemos como burn-in os 2500 primeiros passos e utilizamos como valores de entrada para o MCMC os valores retornados pela função `optimize.curve_fit()` da biblioteca scipy [19]. Como resultado deste processo, foi possível obter as melhores soluções para os parâmetros orbitais dos PCBs a partir da mediana da distribuição resultante do MCMC e os erros inferiores e superiores foram obtidos pelos percentis de 16% e 84% da distribuição.

Por fim, uma vez que obtivemos as melhores soluções orbitais para os PCBs, fomos capazes de realizar a evolução orbital do sistema, a fim de verificar a estabilidade do mesmo. Para isso, utilizamos a biblioteca Rebound [20] que é um integrador numérico de um sistema de N-corpos que interagem gravitacionalmente entre si. Para este passo, seguimos [21, 22] e integramos a solução orbital para os próximos 100 milhões (tempo de vida estimado da fase pós envelope comum da binária) de anos, utilizando um passo de 1/120 do período orbital do corpo mais externo.

Resultados e Discussões

A melhor solução obtida para dois PCBs, indica que estes possuem órbitas com períodos de cerca de 3310 dias (e excentricidade de 0.44), para o mais interno, e 9783 dias (com excentricidade de 0.07), para o mais externo. Os períodos que se assemelham a aqueles

obtidos em [16, 22], mas divergem em excentricidade, uma vez que este valor é significativamente maior para o corpo mais interno e menor para o corpo mais externo. A qualidade de tal solução pode ser atestada pelo trace plot (Figura 2), pelo diagrama corner (Figura 3), pelos ajustes mostrados na Figura 4 e pelo chi-quadrado reduzido, cujo valor obtido foi de 0.328. A Tabela 1 mostra as soluções orbitais obtidas para cada um dos corpos externos e a Figura 5 mostra a configuração orbital dos dois PCBs em comparação com as órbitas de Júpiter e Saturno.

Ao utilizarmos os parâmetros orbitais obtidos anteriormente para analisarmos a evolução orbital do sistema, encontramos que a configuração orbital encontrada é instável em um período de poucos milhões de anos (Myrs). De fato, como mostrado na Figura 6, em cerca de 3 Myrs os PCBs escapam do sistema, um tempo de vida muito menor do que aquele estimado para a fase pós envelope comum da binária [21]. Este resultado indica que somente os PCBs propostos não explicam completamente as variações dos instantes de mínimo dos eclipses observados no sistema.

Conclusão

Neste trabalho, utilizamos dados da literatura e do satélite espacial TESS para analisarmos a hipótese de existência de dois PCBs ao redor do sistema binário eclipsante NY Vir. A análise pelo ETL sugeriu que os dois PCBs possuiriam períodos orbitais de, aproximadamente, 3310 dias para o PCB mais interno e 9783 dias para o PCB mais externo, corroborando com o que já havia sido obtido na literatura, fato que não se repete para as excentricidades.

A análise de evolução orbital mostrou que o sistema com os PCBs é instável em uma escala de tempo de 3 Myrs, corroborando com o que foi obtido na literatura. No entanto, este resultado também nos mostra que somente a hipótese de PCBs é insuficiente para explicar as variações dos instantes que os eclipses ocorrem, podendo ser resultado da atuação de outros efeitos como, por exemplo, o mecanismo Applegate ou devido a variação do movimento apsidal da binária.

Pesquisas futuras são necessárias para analisar o sistema de uma forma mais completa. Em especial, se faz necessário o monitoramento de tal objeto através de outros métodos como, por exemplo, a velocidade radial, uma vez que efeitos como os citados no final do parágrafo anterior podem se tornar evidentes quando vistos sob este prisma e, desta forma, conseguiremos explicar por completo os causadores das variações nos instantes de eclipse deste sistema.

Referências

- [1] Sigurdsson et al., 2003, Sci, 301, 193.
- [2] Doyle et al., 2011, Sci, 333, 1602.
- [3] Heber U., 2016, PASP, 128, 082001.
- [4]: Taam R. E., Sandquist E. L., 2000, ARA&A, 38, 113.
- [5]: Han et al., 2002, MNRAS, 336, 449.

- [6]: Han et al., 2003, MNRAS, 341, 669.
- [7] Almeida et al., 2017, MNRAS, 472, 3093–3100.
- [8] Kilkenney et al., 1998, MNRAS, 296, 329.
- [9] Qian et al., 2012, ApJL, 745, L23.
- [10] Lee et al., 2014, MNRAS, 445, 2331.
- [11] Song et al., 2019, AJ, 157, 184.
- [12] Lightkurve Collaboration, 2018, ascl.soft. ascl:1812.013.
- [13] Jenkins et al., 2016, SPIE, 9913, 99133E.
- [14] Almeida et al., 2012, MNRAS, 423, 478.
- [15] Wilson R. E. Devinney E. J. , 1971, ApJ, 166, 605
- [16] Er et al., 2021, MNRAS, 507, 809.
- [17] Foreman-Mackey et al., 2013, PASP, 125, 306.
- [18] Goodman J., Weare J., 2010, CAMCS, 5, 65.
- [19] Virtanen et al., 2020, Nat Methods 17, 261–272.
- [20] Rein H., Tremaine S., 2011, MNRAS, 415, 3168.
- [21] Mai X., Mutel R. L., 2022, MNRAS, 517, L108.;
- [22] Esmer et al., 2023, MNRAS, 525, 6050.

Anexos

Tabela 1 - Parâmetros da efeméride linear junto com dois ETLs dos corpos circumbinários com base nos ajustes aos instantes dos eclipses primários do NY Vir.

Figura 1 - Diagrama O-C com os dados da literatura e do TESS para os instantes de mínimo dos eclipses primários do sistema binário eclipsante NY Vir.

Figura 2- Trace plot com a variação de cada um dos 12 parâmetros ajustados ao longo de cada uma das 120000 interações.

Figura 3 - Diagrama corner do modelo com dois PCBs. O diagrama expõe gráficos de dispersão que apresenta a correlação entre pares dos 12 parâmetros ajustados. Nas diagonais do diagrama, encontramos as distribuições marginais (histogramas) destes parâmetro

Figura 4- Nos primeiros dois painéis, mostramos os diagramas O-C mostrando os efeitos isolados gerados nos instantes de eclipses por cada um dos dois PCBs. No último painel, mostramos o resíduo do ajuste do ETL para o caso com dois PCBs.

Figura 5 - Configuração orbital do sistema NY Vir com dois PCBs: o mais interno que chamamos de NY Vir b e o mais externo que chamamos de NY Vir c. Para efeitos de comparação, mostramos também as órbitas de Júpiter e Saturno.

Figura 6 - Evolução orbital das excentricidades (primeira figura) e dos semi-eixos maiores (segunda figura), mostrando a instabilidade da solução orbital obtida para dois PCBs. Após cerca de 3 Myrs, podemos ver claramente que os dois PCBs escapam

CÓDIGO: ET1708

AUTOR: PEDRO VICTOR DA COSTA SANTOS

ORIENTADOR: KELLEN CARLA LIMA

TÍTULO: Avaliação do Uso de Índices de Precipitação para Previsão de Dengue nas Capitais do Nordeste Brasileiro com Random Forest

Resumo

Este estudo avaliou o impacto de índices de precipitação na previsão mensal de casos de dengue nas capitais do Nordeste do Brasil (NEB) utilizando o algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest. Foram testados três conjuntos de variáveis (feature sets) com complexidade crescente, incorporando dados epidemiológicos e climáticos. Os resultados demonstram que variáveis autorregressivas, como o número de casos de dengue no mês anterior, são os preditores mais dominantes e os índices climáticos extremos de precipitação mais relevantes variam por capital. A adição de múltiplas variáveis de precipitação extrema (feature set 3) resultou em degradação do desempenho dos modelos, introduzindo ruído e causando sobreajuste, sem melhorar a capacidade preditiva. Uma falha consistente em todos os modelos foi a subestimação da magnitude dos picos epidêmicos, indicando que apenas as variáveis de precipitação e os casos recentes são insuficientes para prever surtos de grande escala. Conclui-se que, embora as variáveis climáticas sejam relevantes, a previsão acurada de epidemias de dengue exige a consideração de outros fatores.

Palavras-chave: Previsão. Aprendizado de máquina. Variáveis climáticas.

TITLE: Evaluation of the Use of Precipitation Indices for Dengue Forecasting in the Capitals of Northeast Brazil with Random Forest

Abstract

This study evaluated the impact of precipitation indices on monthly dengue case forecasts in the capitals of Northeast Brazil (NEB) using the Random Forest machine learning algorithm. Three feature sets with increasing complexity were tested, incorporating epidemiological and climatic data. The results show that autoregressive variables, such as the number of dengue cases in the previous month, are the most dominant predictors, and the most relevant extreme precipitation climate indices vary by capital city. The addition of multiple extreme precipitation variables (feature set 3) resulted in a degradation of model performance, introducing noise and causing overfitting, without improving predictive ability. A consistent flaw in all models was the underestimation of the magnitude of epidemic peaks, indicating that precipitation variables and recent cases alone are insufficient to predict large-scale outbreaks. It is concluded that, although climatic variables are relevant, accurate prediction of dengue epidemics requires consideration of other factors.

Keywords: Forecasting. Machine learning. Climate variables.

Introdução

A dengue constitui um desafio para a saúde pública no Brasil. A transmissão dessa doença, que ocorre predominantemente pelo vetor *Aedes aegypti*, requer um sistema de vigilância epidemiológica contínuo, cujos dados são gerenciados pelo Sistema de Informação de Agravos de Notificação (Sinan) (Brasil, 2007). A Região Nordeste do Brasil (NEB), especificamente, tem registrado taxas de incidência elevadas, fato que evidencia a relevância regional da problemática (Sousa et al., 2025).

Aedes aegypti, é caracterizada padrão sazonal e por surtos de magnitude variável, que sobrecarregam os sistemas de saúde e causam considerável morbidade e mortalidade. Neste contexto, o desenvolvimento de modelos de previsão acurados e tempestivos é uma ferramenta fundamental para a vigilância em saúde pública, permitindo o planejamento de intervenções, a alocação de recursos e a emissão de alertas precoces para mitigar o impacto de futuras epidemias. (Roster; Connaughton; Rodrigues, 2022; Medeiros, 2024).

O impacto de tal enfermidade transcende a esfera sanitária, acarretando ônus econômicos consideráveis. Uma investigação conduzida por Shepard et al. (2011) demonstrou que, no intervalo de 2000 a 2007, ao Brasil foi atribuída a responsabilidade por aproximadamente 40% da totalidade dos casos de dengue e dos custos associados à morbidade nas Américas. Tal conjuntura serve de catalisador para o desenvolvimento de modelos preditivos, cuja finalidade é a antecipação de surtos epidêmicos, viabilizando, por conseguinte, uma alocação de recursos mais criteriosa e a implementação de ações preventivas.

A literatura científica tem explorado diversas abordagens para a prognose da incidência de arboviroses. Modelos estatísticos de séries temporais, a exemplo do Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA), são empregados com frequência para a captura de tendências e padrões de sazonalidade (Kane et al., 2014). Mais recentemente, observa-se a proeminência de técnicas de aprendizado de máquina (em inglês, machine learning), em virtude de sua capacidade de modelar as complexas relações não lineares entre vetores, variáveis climáticas e a incidência de doenças. Algoritmos como Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM) e Redes Neurais Artificiais (RNA) mostram-se particularmente adequados para tal finalidade, uma vez que permitem a identificação de padrões sutis em vastos repositórios de dados, os quais não seriam discerníveis mediante abordagens lineares (Galasso et al., 2022; Tyralis; Papacharalampous, 2017). O algoritmo Random Forest, em particular, demonstra notável eficácia na identificação dos preditores de maior relevância e no manejo de dados de alta dimensionalidade, exibindo, em determinados cenários, um poder preditivo superior ao de modelos ARIMA tradicionais (Kane et al., 2014; Goehry et al., 2023). Algoritmos de gradient boosting, como o XGBoost, evidenciam elevada acurácia na predição de séries temporais meteorológicas de natureza complexa, como a precipitação (Mishra et al., 2024).

Um fator crucial na dinâmica de transmissão das arboviroses em tela é a variável climática. As alterações climáticas, ao modificarem os regimes de temperatura e precipitação, podem gerar condições ambientais mais propícias à proliferação do *Aedes aegypti* (Bhatt et al., 2021). A ocorrência de precipitações mais frequentes e intensas resulta na ampliação da disponibilidade de criadouros larvários, tais como recipientes com água estagnada, indispensáveis ao ciclo de desenvolvimento do mosquito (Almeida et al., 2022). Conclui-se, portanto, que a análise não deve se restringir à precipitação acumulada, mas deve também contemplar a frequência e a intensidade de eventos pluviométricos extremos.

Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar a contribuição dos índices extremos de precipitação na previsão mensal de casos de dengue nas capitais do NEB.

Metodologia

2.1 Área de Estudo

O escopo geográfico da presente investigação compreende as capitais dos nove estados que integram a Região Nordeste do Brasil (NEB), a saber: São Luís (MA), Teresina (PI), Fortaleza (CE), Natal (RN), João Pessoa (PB), Recife (PE), Maceió (AL), Aracaju (SE) e Salvador (BA). A referida região constitui a segunda mais populosa do país e caracteriza-se por uma notável complexidade climática, com gradientes que se estendem do semiárido ao tropical úmido. Sua dinâmica atmosférica é marcadamente influenciada por sistemas de grande escala, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (Gomes; Lima, 2021).

2.2 Dados

2.2.1 Casos de Arboviroses

Os dados referentes às notificações semanais de casos de dengue (período de 2000 a 2020) para cada uma das capitais, foram extraídos do Sistema de Informação de Agravos de Notificação (Sinan). A aquisição dos dados foi efetuada por meio do pacote PySUS, uma ferramenta desenvolvida na linguagem de programação Python, a qual permite o acesso programático ao repositório do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS) (Coelho et al., 2021).

2.2.2 Precipitação

Para a caracterização do regime pluviométrico histórico, serão empregados dados diários de precipitação provenientes do produto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS), abrangendo o período de 1990 a 2022. Este conjunto de dados, que resulta da fusão de observações de satélite com registros de estações pluviométricas in situ, distingue-se por sua elevada resolução espacial ($0,05^\circ \times 0,05^\circ$). A seleção do CHIRPS fundamenta-se em sua comprovada alta correlação com medições diretas de estações meteorológicas localizadas no NEB (Paredes-Trejo; Barbosa; Kumar, 2017).

2.3 Métodos

O procedimento de análise de dados foi delineado em três etapas sequenciais, as quais são detalhadas a seguir.

2.3.1 Cálculo dos Índices de Extremos Climáticos

Para quantificar a ocorrência de eventos pluviométricos extremos, foram calculados os índices padronizados, definidos pelo Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI), tanto para os dados observados quanto para os projetados. A seleção de índices abrangeu as seguintes métricas:

2.3.2 Previsão dos Casos de Arboviroses

A previsão dos casos mensais de dengue para o período futuro foi efetuada por meio da aplicação de aprendizado de máquina. Para isso, utilizou-se o algoritmo Random Forest (RF). A RF é particularmente vantajosa para a modelagem preditiva de séries temporais, dada sua

não pressuposição de linearidade nos dados e sua resiliência a ruídos (Kane et al., 2014; Tyralis; Papacharalampous, 2017). A avaliação do desempenho dos modelos de ML foi conduzida por meio de validação cruzada, com a utilização de métricas como o Erro Quadrático Médio (em inglês, RMSE) e o Erro Absoluto Médio (em inglês, MAE) para a quantificação do erro de predição, coeficiente de Determinação (R^2) para identificar a proporção da variância na variável dependente (neste caso, o número de casos de dengue) que é previsível a partir das variáveis independentes (as demais variáveis utilizados no modelo) (Willmott; Matsuura, 2005; Chai; Draxler, 2014; Zilli; Bastos, 2024).

Os parâmetros do Random Forest utilizado foram: número máximo de árvores igual a 100 e profundidade máxima da árvore igual a foram testados os valores 2, 6 e 10, sendo o valor 10 escolhido por apresentar melhores resultados. Os valores utilizados se baseiam nos testes da literatura com dados meteorológicos e de dengue (Roster; Connaughton; Rodrigues, 2022).

Para a realização da previsão de casos de dengue, separaram-se os dados em dois grupos: o de treinamento e o de teste. O primeiro foi composto por 80% dos dados iniciais disponíveis para cada capital, sendo o número de meses utilizados apresentado pelo valor de N na Figura 1. O segundo foi composto por 20% dos dados finais, sendo utilizado para realização da previsão de dados pelo modelo treinado.

2.3.3 Cálculo da influência relativa das variáveis independentes

Para identificar qual o impacto de cada variável na previsão dos casos de dengue, foi utilizada a métrica de redução da impureza (em inglês, Mean Decrease in Impurity – MDI). Essa métrica foi aplicada a três cenários, cada um com um conjunto de atributos (feature sets) distinto, que variam em complexidade, revelando quais variáveis eles consideram mais informativas para a tarefa de previsão.

No Quadro 1, apresenta-se a descrição das variáveis e disposição nos feature sets. A primeira coluna da esquerda para a direita representa o nome da variável, a segunda seu significado e a terceira em quais feature sets essa variável está presente.

Resultados e Discussões

Na Figura 1, apresenta-se a previsão dos casos de dengue entre 2018 e 2022, utilizando o algoritmo Random Forest para as capitais do NEB considerando três conjuntos de variáveis (Feature set 1, 2 e 3). Na figura são exibidos gráficos de séries temporais que comparam os casos de dengue previstos com os casos reais. Cada gráfico é anotado com métricas de desempenho (MAE, RMSE e R^2) que permitem uma avaliação quantitativa da acurácia das previsões.

A análise da Figura 1 indica um sobreajuste que pode ser corroborado pelos resultados da Figura 2. A transição do Feature Set 2 para o Feature Set 3 resulta em mudanças marginais e mistas no desempenho. Em Maceió e João Pessoa, há uma ligeira melhora, enquanto em Natal e Recife, o desempenho se degrada um pouco. No entanto, a transição do feature set2 para o feature set 3, que é altamente complexo, frequentemente resulta em uma estagnação ou em uma degradação do desempenho. Por exemplo, em Aracaju, o R^2 reduz de 0,59 para 0,55, e o RMSE aumenta de 213,82 para 224,81. Em Fortaleza, o R^2 reduz de 0,71 para 0,67. Com isso, percebe-se que o Feature Set 3 não está adicionando poder preditivo generalizável; em vez disso, estão introduzindo ruído que prejudica a capacidade do modelo de performar bem

em dados não vistos. Com isso fica evidente que é preferível utilizar poucas variáveis de chuva, surgindo a necessidade de realizar uma escolha adequada para cada localidade.

Apesar de um desempenho quantitativo razoável em termos de R^2 em algumas cidades, uma inspeção visual dos gráficos de séries temporais na Figura 2 revela uma falha crítica e consistente em quase todos os modelos. Embora eles capturem a sazonalidade geral e os níveis basais de incidência de dengue, eles subestimam a magnitude dos picos epidêmicos mais intensos. Na maioria das cidades, os casos previstos mostram uma pequena elevação enquanto os casos reais exibem um pico massivo, muitas vezes com uma ordem de magnitude de diferença.

Este é um desafio bem documentado na previsão de doenças infecciosas. Modelos treinados em vários anos de dados "normais" ou com epidemias moderadas lutam para prever eventos de magnitude sem precedentes. Os preditores utilizados — dados climáticos e casos recentes — são insuficientes para explicar a dinâmica não linear que desencadeia surtos explosivos. Essa dificuldade indica a necessidade de considerar outras variáveis (Charilaou; Battat, 2022).

Figura 1 – Previsão dos casos de dengue entre 2018 e 2022, utilizando o algoritmo Random Forest nas capitais do NEB considerando três conjuntos de variáveis (Feature set 1, 2 e 3).

Na Figura 2 apresenta-se a Influência relativa das variáveis independentes para a previsão de casos de dengue nas capitais do NEB considerando três conjuntos de variáveis (feature set 1, 2 e 3), utilizando o algoritmo Random Forest. Nessa figura há uma série de gráficos de barras que ilustram a importância relativa dos atributos. Sendo a organização dividida em três conjuntos de atributos com complexidades distintas. Assim, por meio dos gráficos de barras é possível perceber quais variáveis são mais informativas para a tarefa de previsão.

Uma observação imediata e consistente em todos os gráficos da Figura 2, para todas as nove cidades e nos três feature sets, é a dominância dos atributos autorregressivos: o número de casos de dengue no mês anterior (`casos_1_mes_atras`). Em todos os cenários, esse atributo sozinho responde pela maior parte da importância relativa total, superando a contribuição combinada de todas as variáveis climáticas. Este padrão não é um mero artefato estatístico, mas um reflexo direto do que se pode denominar momento epidemiológico. A incidência de uma doença infecciosa em um determinado período de tempo é fortemente dependente de sua incidência no período imediatamente anterior (Baquero; Santana; Chiaravalloti-Neto, 2018; Chen; Moraga, 2025).

A diluição da importância dos atributos em dezenas de variáveis no feature set 3, sem uma redução correspondente na importância dos termos autorregressivos, sugere que as novas variáveis estão adicionando mais ruído e redundância do que um novo sinal preditivo independente. Em modelos baseados em árvores de decisão, como o Random Forest, quando múltiplos atributos correlacionados estão presentes, a importância pode ser dividida arbitrariamente entre eles, inflando o número de preditores aparentemente úteis sem, de fato, melhorar o poder preditivo do modelo. Este comportamento é um forte indicador de que o modelo pode estar se sobreajustando, uma hipótese que deve ser rigorosamente testada pela análise de seu desempenho em dados não vistos, conforme apresentado na Figura 1 (IBM, 2024).

Na Figura 2, as variáveis mais relevantes para o modelo de previsão variam entre as capitais. Na maioria delas, as variáveis relacionadas a casos de dengue (`casos_dengue_1_mes_atras` e

casos_dengue_2_meses_atras, media_modelvel_2_meses e media_modelvel_3_meses) e a condições climáticas (como precipitacao_2_meses_atras e precipitacao_3_meses_atras) mostraram a maior importância relativa. Em Recife e Teresina, a variável de casos de dengue com um mês de atraso é a mais relevante. Enquanto em Teresina, Natal, São Luís e Maceió, as variáveis climáticas têm um peso maior, tendo pelo menos uma delas presente entre as três variáveis mais influentes. Fortaleza, Natal, Maceió e João Pessoa apresentam o mês como uma das três variáveis mais relevantes, indicando que nessas capitais o componente da sazonalidade pode ter mais impacto.

Conclusão

O objetivo central desta investigação foi determinar a contribuição de variáveis de precipitação, incluindo índices de eventos extremos, para a acurácia da previsão mensal de casos de dengue nas capitais da Região Nordeste do Brasil. A análise, conduzida com o algoritmo Random Forest, revelou de forma consistente que os preditores de maior influência são os autorregressivos, especificamente o número de casos de dengue notificados no mês anterior. Este achado ressalta a importância do que pode ser chamado de "momento epidemiológico", onde a incidência atual da doença é o fator mais forte para prever a incidência futura imediata.

A incorporação de variáveis climáticas demonstrou resultados mistos. A transição do modelo mais simples, que continha apenas variáveis epidemiológicas (Feature Set 1), para um modelo que incluía a precipitação total (Feature Set 2), não resultou em melhorias substanciais e uniformes em todas as cidades. De forma mais contundente, a adição de um vasto conjunto de índices de precipitação extrema (Feature Set 3) frequentemente levou a uma estagnação ou até mesmo a uma degradação do desempenho preditivo, como observado em Aracaju e Fortaleza. Este fenômeno sugere que a alta dimensionalidade e a correlação entre as novas variáveis introduziram mais ruído e redundância do que sinal preditivo, aumentando o risco de sobreajuste do modelo.

Uma limitação crítica e transversal a todos os modelos e cenários testados foi a incapacidade de prever adequadamente a magnitude dos picos epidêmicos. Embora os modelos conseguissem capturar a sazonalidade geral e os níveis basais de incidência da dengue, eles falharam sistematicamente em antecipar a intensidade de surtos explosivos, subestimando-os por uma ordem de magnitude em diversos casos. Isso indica que a dinâmica não linear que desencadeia epidemias de grande escala não é suficientemente explicada pelas variáveis de precipitação ou pelo histórico recente de casos.

Portanto, conclui-se que, para a previsão de rotina da dengue nas capitais do NEB, um modelo mais parcimonioso, focado em variáveis autorregressivas e, possivelmente, em poucas variáveis climáticas chave, é preferível. A previsão de eventos extremos, no entanto, permanece um desafio significativo e demanda a exploração de outras variáveis não contempladas neste estudo para capturar os gatilhos de surtos de alta magnitude.

Referências

ALMEIDA, D. S. de et al. Estudo da relação entre variáveis meteorológicas e ocorrência de casos de dengue em Londrina-PR. Geografia Física, 2022.

- BAQUERO, O. S.; SANTANA, L. M. R.; CHIARAVALLLOTI-NETO, F. Dengue forecasting in São Paulo city with generalized additive models, artificial neural networks and seasonal autoregressive integrated moving average models. PLoS ONE, v. 13, n. 4, e0195065, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195065>. Acesso em: 31 ago. 2025.
- BHATIA, S. et al. A Retrospective Study of Climate Change Affecting Dengue: Evidences, Challenges and Future Directions. *Frontiers in Public Health*, 2021.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Vigilância Epidemiológica. Sistema de Informação de Agravos de Notificação: normas e rotinas. 2. ed. Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2007.
- CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 1247–1250, 30 jun. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>. Acesso em: 31 ago. 2025.
- CHARILAOU, Paris; BATTAT, Robert. Machine learning models and over-fitting considerations. *World Journal of Gastroenterology*, v. 28, n. 5, p. 605–607, 7 fev. 2022.
- CHEN, X.; MORAGA, P. Dengue forecasting and outbreak detection in Brazil using LSTM: integrating human mobility and climate factors. *medRxiv*, 2025. Preprint. Disponível em: <https://www.medrxiv.org/content/early/2025/03/03/2025.03.02.25323168>. Acesso em: 31 ago. 2025.
- COELHO, F. C. et al. AlertaDengue/PySUS: Vaccine. Zenodo, 2021. DOI: 10.5281/zenodo.4883502. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4883502>. Acesso em: 21 jun. 2024.
- GALASSO, J.; CAO, D. M.; HOCHBERG, R. A random forest model for forecasting regional COVID-19 cases utilizing reproduction number estimates and demographic data. *Chaos, Solitons and Fractals*, v. 156, p. 111779, 2022.
- GOEHRY, B. et al. Random Forests for Time Series. *REVSTAT Statistical Journal*, v. 21, n. 2, p. 283-302, abr. 2023.
- GOMES, R. S.; LIMA, K. C. Influence of the modes of climate variability in the Tropical Pacific and Atlantic on accumulated rainfall and reservoir water in Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 41, n. 11, p. 5331-5349, 2021.
- GÓMEZ-CERQUERA, J. M.; MENDEZ-BETANCURT, J. L. Virus del Zika, Chikungunya y Dengue: Tres enfermedades, un mismo vector. *Revista Navarra Médica*, v. 3, n. 1, p. 18-26, 2017.
- IBM. Overfitting vs. Underfitting: what's the difference?. IBM Think. 2024. Disponível em: <https://www.ibm.com/think/topics/overfitting-vs-underfitting>. Acesso em: 31 ago. 2025.
- KANE, M. J. et al. Comparison of ARIMA and Random Forest time series models for prediction of avian influenza H5N1 outbreaks. *BMC Bioinformatics*, v. 15, n. 1, p. 276, 2014.
- MEDEIROS, Eduardo Alexandrino. Desafios no controle da epidemia da dengue no Brasil. *Acta Paulista de Enfermagem*, v. 37, p. eEDT012, 1 jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.37689/acta-ape/2024EDT012>. Acesso em: 31 ago. 2025.
- MISHRA, P. et al. Modeling and forecasting rainfall patterns in India: a time series analysis with XGBoost algorithm. *Environmental Earth Sciences*, v. 83, n. 163, 2024.
- PAREDES-TREJO, F. J.; BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. V. L. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *Journal of Arid Environments*, v. 139, p. 26-40, 2017.
- ROSTER, Kirstin; CONNAUGHTON, Colm; RODRIGUES, Francisco A. Machine-Learning-Based Forecasting of Dengue Fever in Brazilian Cities Using Epidemiologic and Meteorological Variables. *American Journal of Epidemiology*, v. 191, n. 10, p. 1803–1812,

28 set. 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35584963/>. Acesso em: 31 ago. 2025.

SHEPARD, D. S. et al. Economic impact of dengue illness in the Americas. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, v. 84, n. 2, p. 200-207, 2011.

SILVA, M. A. F.; HIGUCHI, P.; SILVA, A. C. Impacto de mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica potencial de *Ilex paraguariensis*. *Rodriguésia*, v. 69, p. 2079, 2018.

SOUSA, Maria Vitalina Alves de et al. AVALIAÇÃO DO PERFIL EPIDEMIOLÓGICO DOS CASOS DE DENGUE NO NORDESTE DO BRASIL. *Revista CPAQV - Centro de Pesquisas Avançadas em Qualidade de Vida*, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 14, 2025. DOI: 10.36692/V17N1-19. Disponível em: <https://revista.cpaqv.org/index.php/CPAQV/article/view/2628>. Acesso em: 31 ago. 2025.

TYRALIS, H.; PAPACHARALAMPOUS, G. Variable Selection in Time Series Forecasting Using Random Forests. *Algorithms*, v. 10, n. 4, p. 114, 2017.

WILLMOTT, C.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, [s. l.], v. 30, p. 79–82, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.3354/cr030079>. Acesso em: 31 ago. 2025.

ZILLI, Carlos Augusto; BASTOS, Lia Caetano. Avaliação em massa de apartamentos com uso dos algoritmos Random Forest e Gradient Boosting: estudo de caso de Florianópolis, Brasil. *Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, Brasil*, v. 44, p. e212297, 2024. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2024.212297. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rdg/article/view/212297>. Acesso em: 31 ago. 2025.

Anexos

Tabela 1 -- Índices climáticos extremos de precipitação. Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 1 -- Descrição das variáveis e disposição nos feature sets. Fonte: elaborado pelo autor

Figura 1 – Previsão dos casos de dengue entre 2018 e 2022, utilizando o algoritmo Random Forest nas capitais do NEB considerando três conjuntos de variáveis (Feature set 1, 2 e 3).
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Figura 2 – Influência relativa das variáveis independentes para a previsão de casos de dengue nas capitais do NEB considerando três conjuntos de variáveis (Feature set 1, 2 e 3), utilizando o algoritmo Random Forest. Fonte: elaborado pelo autor (2025).

CÓDIGO: ET1731

AUTOR: BRUNO BEZERRA BASTOS

ORIENTADOR: MARCELO BORGES NOGUEIRA

TÍTULO: SLAM EKF e PF em robô de baixo custo

Resumo

Este trabalho apresenta a implementação de algoritmos de Localização e Mapeamento Simultâneos (SLAM) utilizando Filtro de Kalman Estendido em uma plataforma robótica de baixo custo com fins educacionais. O sistema é composto por um robô equipado com ESP32-CAM, Arduino Nano, motores com encoders e comunicação via protocolos HTTP e MQTT, além de uma interface de monitoramento remoto. O desenvolvimento foi conduzido em duas etapas principais: simulações em ambiente controlado e testes práticos com o robô físico. Os experimentos de localização e mapeamento evidenciaram a importância de referências externas (ground truth) para avaliação de desempenho, bem como o impacto de erros de calibração no modelo cinemático. Nos testes de SLAM, o filtro mostrou-se eficaz na correção de incertezas, gerando trajetórias e mapas consistentes. Adicionalmente, o sistema foi avaliado de forma informal em contexto educacional, permitindo que alunos controlassem remotamente o robô e coletassem dados em tempo real. Os resultados demonstram que a plataforma desenvolvida é adequada para fins didáticos e possui potencial para aplicação em disciplinas de robótica e sistemas autônomos.

Palavras-chave: SLAM, Filtro de Kalman Estendido, Robótica Educacional

TITLE: SLAM EKF and PF on a low-cost robot

Abstract

This work presents the implementation of Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) algorithms using the Extended Kalman Filter on a low-cost robotic platform designed for educational purposes. The system is based on a robot equipped with an ESP32-CAM, an Arduino Nano, DC motors with encoders, and communication through HTTP and MQTT protocols, along with a remote monitoring interface. The development was carried out in two main stages: simulations in a controlled environment and practical tests with the physical robot. Localization and mapping experiments highlighted the importance of external ground truth for performance assessment, as well as the effects of kinematic model calibration errors. In SLAM experiments, the filter proved effective in mitigating uncertainties, resulting in more consistent trajectories and maps. Additionally, the system was informally evaluated in an educational setting, where students remotely controlled the robot and collected real-time data. The results demonstrate that the proposed platform is suitable for teaching purposes and has potential applications in robotics and autonomous systems courses.

Keywords: SLAM, Extended Kalman Filter, Educational Robotics

Introdução

A robótica educacional tem se consolidado como uma ferramenta fundamental para a formação em engenharia, ciência da computação e áreas correlatas. Por meio do uso de modelos robóticos acessíveis, estudantes podem experimentar de forma prática conceitos de programação, controle, eletrônica e inteligência artificial, transformando conteúdos teóricos em experiências concretas de aprendizado. Nesse contexto, o desenvolvimento de plataformas de baixo custo que permitam a exploração de problemas avançados, como a localização e o mapeamento simultâneos, representa um avanço significativo tanto para a pesquisa quanto para o ensino.

O problema de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) consiste em permitir que um robô móvel construa um mapa do ambiente ao mesmo tempo em que estima sua própria posição nesse espaço. Trata-se de um dos maiores desafios da robótica móvel autônoma, por envolver incertezas nos sensores, nos atuadores e no ambiente. A solução de SLAM é de grande relevância prática, sendo empregada em áreas como veículos autônomos, drones de inspeção, logística automatizada e sistemas de resgate. No campo educacional, sua implementação em plataformas acessíveis amplia a compreensão de técnicas de estimação, controle e visão computacional, aproximando estudantes da realidade de sistemas autônomos modernos.

Diversos métodos têm sido propostos para a solução do problema de SLAM, destacando-se aqueles baseados em filtros probabilísticos. Entre eles, o Filtro de Kalman Estendido (EKF-SLAM) é amplamente utilizado por sua formulação relativamente simples e pela possibilidade de implementação em sistemas com recursos computacionais limitados. O EKF-SLAM se baseia em duas etapas fundamentais: a predição, que estima o estado futuro do robô a partir de seu modelo de movimento, e a atualização, que corrige essa predição com base em observações do ambiente, como marcos visuais detectados por câmeras ou sensores. Essa abordagem permite reduzir os erros acumulados pela odometria e alcançar maior confiabilidade na estimativa da trajetória e do mapa.

A adoção de plataformas de baixo custo para a implementação prática de algoritmos de SLAM apresenta uma dupla relevância: por um lado, possibilita a democratização do acesso a tecnologias avançadas, permitindo que instituições de ensino e grupos de pesquisa com recursos limitados desenvolvam experimentos significativos; por outro, coloca em evidência os desafios adicionais impostos pelas restrições de hardware, como capacidade de processamento reduzida, sensores de menor precisão e comunicações sujeitas a ruídos e atrasos. Nesse sentido, o trabalho aqui descrito propõe não apenas a implementação do EKF-SLAM em uma plataforma educacional, mas também o desenvolvimento de ferramentas auxiliares, como interfaces gráficas e ambientes de simulação, que favoreçam o processo de ensino-aprendizagem.

O presente projeto de pesquisa tem como objetivo geral a implementação de métodos para a solução do SLAM utilizando o Filtro de Kalman Estendido, integrados ao desenvolvimento de ferramentas didáticas, como modelos robóticos de baixo custo e interfaces gráficas para monitoramento remoto. Por meio de testes controlados, o robô deve ser capaz de utilizar os dados coletados por seus sensores e câmera RGB para realizar algoritmos de localização e mapeamento. Como objetivos específicos, destacam-se: a conclusão da implementação prática do EKF-SLAM; o desenvolvimento de uma interface gráfica de controle e visualização que permita monitoramento remoto via Wi-Fi utilizando protocolos como HTTP e MQTT; e a realização de experimentos progressivos, iniciando em simulações e avançando para testes práticos com o robô físico.

Assim, este trabalho insere-se no cruzamento entre pesquisa científica e prática educacional, buscando tanto validar métodos de SLAM em ambientes de baixo custo quanto criar um recurso didático que contribua para a formação de estudantes em robótica e sistemas autônomos.

Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho foi organizada de forma a conciliar a implementação prática de algoritmos de SLAM com o desenvolvimento de ferramentas educacionais que favoreçam sua utilização em contextos de ensino. O plano de trabalho partiu de simulações computacionais, avançando gradualmente para experimentos práticos com a plataforma robótica construída no projeto, de modo a reduzir riscos de falhas e permitir validação incremental das soluções propostas.

Plataforma robótica

O robô utilizado neste trabalho foi desenvolvido em montagem própria com o objetivo de ser acessível, modular e adequado ao ensino de robótica. A escolha do hardware priorizou componentes de baixo custo, amplamente disponíveis no mercado, permitindo que o sistema possa ser reproduzido em ambientes acadêmicos com recursos limitados.

O sistema embarcado é baseado em uma arquitetura de dois controladores complementares. O ESP32-CAM é responsável pela captura de imagens por meio de sua câmera RGB integrada, além de realizar a comunicação sem fio com a estação remota, transmitindo vídeo via protocolo HTTP e dados de telemetria via MQTT. Esse módulo desempenha papel fundamental na etapa de percepção, uma vez que a câmera é empregada para a detecção de marcos visuais no ambiente, insumos indispensáveis para a atualização do EKF-SLAM.

O Arduino Nano, por sua vez, atua como controlador dedicado de tempo real para os atuadores, recebendo comandos de velocidade e acionando os motores de corrente contínua através de uma ponte H. Além disso, é responsável pela leitura dos encoders acoplados aos motores, que fornecem a odometria necessária para o modelo de movimento do robô. Essa separação de funções entre os controladores permitiu reduzir a latência do controle motor, ao mesmo tempo em que liberou o ESP32-CAM para tarefas de comunicação e visão computacional.

A plataforma é alimentada por duas baterias Li-ion, o que garante autonomia suficiente para experimentos de curta duração, embora imponha limitações quanto ao tempo total de operação e exija gerenciamento cuidadoso da energia. A montagem mecânica foi projetada de forma artesanal, característica que reforça o caráter educacional do projeto, mas que também trouxe desafios de alinhamento das rodas e calibração da odometria.

Ambiente de simulação e interface gráfica

Antes da implementação prática, foi desenvolvido um ambiente de simulação com interface gráfica capaz de reproduzir cenários simplificados de navegação robótica. Esse ambiente foi utilizado para validar algoritmos de localização e mapeamento em condições controladas, além de permitir ajustes de parâmetros do EKF-SLAM sem os custos de tempo e desgaste mecânico do robô físico.

A interface gráfica também foi projetada como ferramenta didática, com recursos para visualização em tempo real da trajetória estimada, das posições de marcos visuais detectados e da comparação entre a odometria e a posição corrigida pelo filtro. A comunicação entre o simulador e a plataforma robótica ocorre via Wi-Fi, utilizando HTTP para transmissão de vídeo e MQTT para troca de comandos e dados de telemetria.

Essa abordagem modular permitiu que o mesmo ambiente fosse utilizado tanto com o robô físico quanto com agentes simulados, favorecendo a continuidade dos testes e servindo como recurso educacional para a compreensão dos resultados.

Algoritmo de SLAM com Filtro de Kalman Estendido

A implementação do SLAM foi realizada por meio do Filtro de Kalman Estendido (EKF), escolhido por sua formulação relativamente simples e adequação a plataformas de baixo custo. O algoritmo é estruturado em duas etapas principais:

Predição: utiliza a odometria obtida pelos encoders para estimar a nova posição do robô a partir do modelo de movimento.

Atualização: emprega observações dos marcos visuais obtidos pela câmera do ESP32-CAM para corrigir a estimativa, reduzindo a incerteza acumulada pela predição.

A execução do EKF-SLAM foi implementada em um servidor remoto (notebook ou computador de bancada), de modo a contornar as limitações computacionais da plataforma embarcada. Esse servidor recebe os dados enviados pelo robô, processa o algoritmo e retorna informações relevantes para monitoramento.

Essa divisão entre captura/processamento leve no robô e processamento intensivo no servidor permitiu conciliar a utilização de hardware acessível com a execução de algoritmos de maior complexidade, além de reforçar o caráter didático ao tornar mais visível a interação entre diferentes níveis de um sistema robótico.

Procedimentos experimentais

Os experimentos foram organizados de forma progressiva, iniciando em simulações e evoluindo para testes práticos com o robô físico. Essa abordagem incremental buscou mitigar riscos de falhas e possibilitar ajustes graduais no sistema. As etapas foram estruturadas da seguinte forma:

Simulação da localização: validação inicial do modelo de movimento e da etapa de predição do EKF.

Testes práticos de localização: utilização do robô físico com odometria fornecida pelos encoders.

Simulação do mapeamento: inclusão de marcos virtuais para validação da etapa de atualização do EKF.

Testes práticos de mapeamento: detecção de marcos visuais reais com a câmera do ESP32-CAM.

Simulação completa de SLAM: integração das etapas de localização e mapeamento em ambiente virtual.

Testes práticos de SLAM: execução do EKF-SLAM completo com o robô em ambiente físico controlado.

Durante os experimentos, foram monitorados parâmetros como trajetória estimada, tempo de processamento e consistência entre simulação e prática. Além disso, buscou-se registrar observações qualitativas acerca da robustez do sistema frente a ruídos de sensores, limitações mecânicas e falhas de comunicação.

Resultados e Discussões

Os experimentos realizados permitiram validar gradualmente o funcionamento do sistema de localização e mapeamento, desde simulações em ambiente controlado até testes práticos com o robô físico. A seguir, apresentam-se os principais resultados obtidos e sua análise crítica.

Resultados em simulação

Os testes iniciais em ambiente de simulação confirmaram o funcionamento básico do EKF-SLAM. Foi possível validar tanto a etapa de predição, baseada na odometria, quanto a atualização do filtro a partir de marcos visuais virtuais. A interface gráfica desenvolvida permitiu visualizar em tempo real a trajetória estimada e a correção promovida pelas observações, o que facilitou o ajuste de parâmetros e o entendimento dos efeitos do algoritmo.

Testes práticos de localização

Na fase prática de localização, a posição final estimada pelo robô foi comparada com a posição real observada em campo. Como não havia ground truth contínuo, a métrica de erro foi baseada apenas na discrepância entre a posição final e a posição real ao término do percurso. Os resultados foram condizentes com o esperado: o erro médio foi apenas ligeiramente maior do que o previsto nas simulações, permanecendo em um nível aceitável para a aplicação educacional. Essa diferença foi atribuída às incertezas inerentes ao ambiente físico, tais como deslizamento das rodas e pequenas variações na resposta dos motores.

Testes práticos de mapeamento

Na etapa de mapeamento, ficou evidente a necessidade de um ground truth confiável para a avaliação do desempenho. Inicialmente, tentou-se utilizar a própria odometria dos encoders como referência, mas essa estratégia levou a resultados inconsistentes, já que o acúmulo de erros de posição comprometia a avaliação do mapa. Como alternativa, utilizou-se um espaço delimitado por marcações no chão do laboratório, em forma de quadrado de aproximadamente 1,6 m de lado.

Os resultados mostraram que o modelo cinemático do robô não estava perfeitamente calibrado: a distância entre rodas assumida no modelo diferia da real, o que gerava distorções na trajetória estimada. Optou-se por não recalibrar o robô, justamente para verificar a robustez do algoritmo frente a um modelo imperfeito. Essa decisão se mostrou adequada, pois os erros observados reforçaram a relevância do processo de atualização do filtro no SLAM.

Testes práticos de SLAM

Na execução completa do EKF-SLAM, integrando localização e mapeamento simultâneos, os resultados confirmaram a capacidade do filtro de corrigir erros sistemáticos de calibração. Observou-se, de forma qualitativa, que o mapa produzido apresentava maior consistência e que a trajetória estimada acompanhava de forma mais fiel o percurso real. Embora não tenham sido coletadas métricas quantitativas contínuas, a análise visual evidenciou o impacto positivo do EKF, que reduziu o desvio acumulado pela odometria e compensou imperfeições do modelo.

Aspecto educacional

Além dos testes técnicos, o sistema foi avaliado em um contexto educacional de forma informal, em uma turma de alunos. Cada estudante acessou o robô a partir de seu próprio computador, enviando comandos de controle via protocolo MQTT e recebendo, em tempo real, os dados de odometria e a transmissão de vídeo por HTTP. Essa atividade demonstrou que a plataforma, apesar de suas limitações, possui grande potencial didático, permitindo que alunos experimentem conceitos de controle, comunicação em rede, visão computacional e estimação de estados em um ambiente integrado e acessível.

Conclusão

O presente trabalho apresentou a implementação prática do algoritmo de SLAM utilizando Filtro de Kalman Estendido em uma plataforma robótica de baixo custo, projetada com fins educacionais. A integração entre microcontroladores dedicados, comunicação em rede e uma interface de monitoramento remoto permitiu a realização de experimentos que contemplaram as etapas de localização, mapeamento e operação simultânea.

Os testes práticos demonstraram que, mesmo diante de limitações do modelo e de incertezas inerentes ao ambiente físico, o EKF foi capaz de reduzir significativamente o impacto de erros de calibração e de odometria, produzindo trajetórias e mapas mais consistentes. Ficou evidente também a importância do uso de referências externas para validação dos resultados, uma vez que a odometria isolada não é suficiente como ground truth.

Do ponto de vista educacional, a plataforma mostrou-se eficaz para a demonstração de conceitos fundamentais de robótica e estimação de estados. A possibilidade de acesso remoto, com múltiplos usuários interagindo em tempo real, ampliou o potencial de aplicação em contextos didáticos, tornando o sistema uma ferramenta atrativa para a formação em engenharia e áreas correlatas.

Como trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a calibração dos parâmetros do modelo, explorar métricas quantitativas mais robustas para avaliação de desempenho e ampliar os experimentos em ambientes mais complexos.

Referências

John J. Craig. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Addison-Wesley Publishing Company, 1986.

Ioannis M. Rekleitis. Cooperative Localization and Multi-Robot Exploration. PhD thesis, School of Computer Science, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, February 2003.

R Smith, M Self, and P Cheeseman. Estimating uncertain spatial relationships in robotics. In Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on, volume 4, pages 850, 850, 1987.

H. Durrant-Whyte. Uncertain geometry in robotics. In Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE

International Conference on, volume 4, pages 851-856, 1987.

H. Durrant-Whyte and T. Bailey, Simultaneous localization and mapping: part I, Robotics & Automation Magazine, IEEE, vol. 13, no. 2, pp. 99-110, 2006.

T. Bailey and H. Durrant-Whyte, Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II, Robotics & Automation Magazine, IEEE, vol. 13, no. 3, pp. 108-117, 2006.

H. Durrant-Whyte, D. Rye, and E. Nebot. Directed sonar navigation. In Robotics Research: The 7th International Symposium ISRR 95, pages 613-625, 1996.

Dieter Fox, Henry Hexmoor, and Maja Mataric. A probabilistic approach to concurrent mapping and localization for mobile robots. Machine Learning, 31:29-53, 1998.

D. J Spero and R. A Jarvis. A new solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. February 2008.

J.M. Porta. CuikSLAM: a kinematics-based approach to SLAM. In Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on, pages 2425-2431, 2005.

Paul Michael Newman. EKF based navigation and SLAM, July 2004. SLAM Summer School 2004, Toulouse.

M.W.M.G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H.F. Durrant-Whyte, and M. Csorba. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 17(3):229-241, 2001.

Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, Daphne Koller, and Ben Wegbreit. FastSLAM: a factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence, pages 593-598, 2002.

Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, Daphne Koller, and Ben Wegbreit. FastSLAM 2.0: An improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges. In Proceedings of the Int. Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI), pages 151-1156, 2003.

J. Neira and J.D. Tardos. Data association in stochastic mapping using the joint compatibility test. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 17(6):890-897, 2001. [16] J.J.

Leonard and H.F. Durrant-Whyte. Mobile robot localization by tracking geometric beacons. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 7(3):376-382, 1991.

Y. Chen, Y. Zhou, Q. Lv and K. K. Deveerasetty, "A Review of V-SLAM*," 2018 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), 2018, pp. 603-608, doi:

10.1109/ICInfA.2018.8812387.

Thrun, Sebastian, Wolfram Burgard, e Dieter Fox. Probabilistic Robotics. Cambridge, Mass.: The MIT Press, 2005.

Yatim, Norhidayah, e Norlida Buniyamin. "Particle filter in simultaneous localization and mapping (Slam) using differential drive mobile robot". Jurnal Teknologi 77 (1o de dezembro de 2015). <https://doi.org/10.11113/jt.v77.6557>.

CÓDIGO: ET1741

AUTOR: ITZZAC GUILHERME MENDONCA DOS ANJOS BELTRAO

ORIENTADOR: CAMILA PACELLY BRANDÃO DE ARAÚJO

TÍTULO: Obtenção e avaliação do potencial de nitretos de metais refratários como materiais catalíticos para reforma do metano

Resumo

Os nitretos e carbetos de metais refratários destacam-se no cenário de transição energética devido às suas propriedades eletrônicas, térmicas e químicas, como alta condutividade elétrica, resistência química e térmica, e estabilidade mesmo em ambientes oxidantes. Eles são promissores em aplicações catalíticas, como na produção de hidrogênio, conversão de CO₂ em combustíveis sintéticos e armazenamento de energia em baterias e supercapacitores.

Este trabalho é um estudo da obtenção do nitreto de tungstênio (WN_x) a partir de reações gás-sólido em forno resistivo com atmosfera de nitrogênio e hidrogênio. Visando garantir um meio de síntese não tóxica do material como catalisador para seu uso em reações pertinentes ao processo de produção e armazenamento de hidrogênio.

Palavras-chave: Catálise, Transição Energética, Nitreto de Tungstênio, Nitretação

TITLE: Synthesis and evaluation of the potential of refractory metal nitrides as catalytic materials for methane reforming.

Abstract

Transition metal nitrides and carbides stand out in the energy transition environment due to their electronic, thermal, and chemical properties, such as high electrical conductivity, chemical and thermal resistance, and stability even in oxidizing environments. They are promising in catalytic applications, such as in hydrogen production, CO₂ conversion into synthetic fuels, and energy storage in batteries and supercapacitors.

This work is a study of the possibility of obtaining Tungsten Nitride (WN_x) from gas-solid reactions in a resistive furnace with a nitrogen and hydrogen atmosphere. The aim is to ensure a non-toxic synthesis method for the material for its use as a catalyst in reactions relevant to the hydrogen production and storage processes.

Keywords: Catalysis, Energy Transition, Tungsten Nitride, Nitridation

Introdução

O hidrogênio é considerado uma fonte de energia altamente promissora e, atualmente, um vetor energético fundamental na transição do mercado global para uma economia sustentável de baixo carbono, apresentando uma versatilidade de usos em muitos setores da indústria, transporte e no setor de energias, por apresentar características vantajosas.

No seu uso em células a combustível, por exemplo, o hidrogênio é alimentado no ânodo da célula, onde ocorre uma reação eletroquímica com oxigênio (do ar ou fornecido separadamente), resultando em eletricidade, calor e água como único subproduto. Assim, as células de combustível permitem a produção de eletricidade limpa sem emissões de poluentes (IZHAR & NAGAI, 2008; Jiang, 2006). Na área de transportes, já é possível equipar veículos com estas células a combustível, produzindo meios de transporte elétricos, com zero emissão de poluentes, sendo uma alternativa à combustíveis fósseis.

No entanto, mesmo apresentando enorme potencial, alguns desafios tecnológicos ainda precisam ser superados para que essa alternativa energética possa ser utilizada com eficácia na indústria. Sendo esses problemas ligados à viabilidade dessa alternativa, por seu alto custo (GRUPO DE ESTUDOS DO SETOR ELÉTRICO, 2023), e principalmente, o seu armazenamento, ainda sendo carente de tecnologias que ofereçam ao mesmo tempo maior capacidade de armazenamento e segurança, com menor custo (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2024).

Existem várias maneiras de armazenar hidrogênio, cada uma com suas características e aplicabilidades específicas (Rusman & Dahari, 2016). Utilizando compressão gasosa, pode ser armazenado em recipientes, geralmente em cilindros de aço, a altíssimas pressões, variando de cerca de 200 a 700 bar, para reduzir o volume ocupado. Além disso, a liquefação do gás também é uma opção, porém o hidrogênio precisa ser mantido a temperaturas muito baixas (-253°C). Porém, esses métodos requerem, respectivamente, recipientes de custo e complexidade elevados para serem utilizados com segurança, e enorme demanda de energia para manter o gás resfriado.

Uma das opções viáveis é o armazenamento químico do gás, onde o hidrogênio é armazenado na forma química em compostos que liberam hidrogênio quando aquecidos ou tratados com agentes químicos específicos. Por exemplo, o hidrogênio pode ser armazenado na estrutura de compostos orgânicos de fase líquida; esses compostos podem então ser transportados normalmente em caminhões tanques, navios cargueiros etc. e, ao chegar no local de uso do hidrogênio podem ser submetidos a aquecimento e liberar o gás (Shirvani et al, 2023). Nesse contexto, nitretos e carbetos de metais refratários apresentam capacidades catalíticas significativas em reações de hidrogenação de compostos orgânicos (FRAUWALLNER et al., 2011, Hou et al., 2015, Prats et al., 2019), que podem ser utilizadas no processo de adição do hidrogênio aos compostos orgânicos para garantir a eficácia e segurança da alternativa de armazenamento do gás.

Assim, esse trabalho se propõe a obter e caracterizar metais refratários, em específico o Nitreto de Tungstênio (WN_x), para avaliar sua utilidade em processos de produção e armazenamento do hidrogênio. A proposta se mostra desafiadora, pois temos na literatura mais estudos sobre os carbetos, enquanto os estudos acerca dos nitretos de metais refratários ainda não foram tão bem estabelecidos, carecendo de rotas de síntese seguras e viáveis para produção em escala. Portanto, a pesquisa busca não apenas desenvolver uma rota sintética

eficaz, mas também aplicar este material nas áreas mais cruciais da transição energética, para a viabilização da economia do hidrogênio. A pesquisa ganha um contexto especial, uma vez que é realizada no Rio Grande do Norte, um dos maiores produtores nacionais do minério de Scheelita (CaWO_4), o principal minério de tungstênio, fomentando a possibilidade de transformar o estado cada vez mais em um protagonista no cenário da inovação sustentável.

Metodologia

Paratungstato de amônio (RN MATERIAIS, 99%), foi separado em três de amostras de 1g cada, pesadas em balança analítica, cominuídas com o auxílio de pistilo e cadinho de ágata até obtenção de pó de coloração branca e tamanho uniforme (visualmente). Em seguida, as amostras foram transferidas integralmente, a cada novo experimento, para uma navícula de alumina, a qual foi inserida no reator tubular horizontal (EDG-10PS, EDG Equipamentos). O sistema foi selado e então iniciou-se a purga com argônio por aproximadamente 15 minutos. Então o fluxo de argônio foi substituído pelo de gases reagentes na vazão total de 15L/h, constituída por 3,78 L/h de Nitrogênio (White Martins, 99,999%) e os 11,22L/h restantes constituídos por Hidrogênio (White Martins, 99,999%), controlados, respectivamente por rotâmetro e fluxímetro de massa digitalmente controlado por sistema Arduino. A programação de temperatura do forno foi iniciada com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ até a as temperaturas de patamar estabelecidas de 600°C , 700°C e 800°C . O sistema foi mantido nessa temperatura por 180 minutos e, em seguida, foi deixado resfriar na atmosfera reativa até a temperatura ambiente, após a qual foi novamente trocada para atmosfera inerte. O sólido assim obtido foi caracterizado por difração de raios X (DR-X) utilizando um difratômetro equipado com radiação $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). As análises foram realizadas na faixa de 2θ de 20° a 90° , passo de $0,02^\circ$ e tempo de aquisição de 0,3 s por passo. Os difratogramas foram analisados utilizando o software Highscore Plus. Posteriormente, foi calculado o tamanho dos cristalitos dos materiais obtidos, utilizando a equação de Scherrer (Figura 1). As condições reacionais desse estudo preliminar se baseiam no trabalho de VIEIRA (2010) os quais estudaram a síntese de carbetos de molibdênio, material de natureza similar ao proposto neste trabalho.

Resultados e Discussões

Amostra 1: síntese com temperatura 600°C .

A Figura 1 apresenta os padrões de difração obtidos para os materiais sintetizados na condição de temperatura de 600°C . Foram observadas, com uso do software Highscore Plus, a formação da fase cristalina majoritária Óxido de Tungstênio, cujo padrão de difração foi indexado usando a carta padrão JCPDS (00-032-1393), além de Dióxido de Tungstênio, padrão indexado pela carta JCPDS (00-020-1324). O software permite ainda, visualizar a proporção dos dois materiais, conforme mostra na Figura 2.

O tamanho do cristalito, calculado utilizando a equação de Scherrer, foi de 3,2 nanômetros.

Amostra 2: síntese com temperatura 700°C .

O difratograma de raios X para a amostra preparada a 700°C está ilustrado na Figura 3. A análise das fases cristalinas identificou a fase predominante como, também, Óxido de

Tungstênio, que foi devidamente indexada com base na ficha cristalográfica JCPDS (01-089-3728). Foi detectada a presença de uma fase secundária de Tungstênio metálico, correspondente à ficha JCPDS (01-088-0545). A Figura 4 apresenta a quantificação relativa de cada fase identificada na amostra.

O tamanho calculado do cristalito foi de 3,7 nanômetros.

Amostra 3: síntese com temperatura 800°C.

A Figura 5 exibe os resultados da análise de difração de raios X para o material obtido na temperatura de 800 °C. O software identificou os picos de difração característicos de mais duas fases cristalinas. A fase majoritária foi atribuída ao Tungstênio metálico, com seus picos correspondendo à carta padrão JCPDS (01-089-3728). A segunda fase, o Óxido de Tungstênio, indexada pela carta JCPDS (01-088-0545), ainda é observada. A proporção entre as fases encontradas pode ser visualizada no gráfico da Figura 6.

O cristalito teve tamanho calculado de 4,1 nanômetros.

Discussão

A análise dos difratogramas revela uma evolução das fases cristalinas conforme a temperatura de síntese é elevada, comportamento que pode ser visto no gráfico da Figura 7. A 600 °C, observa-se a predominância de fases oxigenadas, com aproximadamente 73% de Óxido de Tungstênio e 27% de Dióxido de Tungstênio. Este mapeamento das fases iniciais e intermediárias é importante para o estudo, sugerindo um mecanismo em etapas. Com a elevação da temperatura para 700 °C, a redução do óxido se intensifica, resultando na primeira aparição de Tungstênio metálico (41%), enquanto a concentração de Óxido de Tungstênio decai para 59%.

Essa progressão observada, na qual a fase metálica surge a partir da redução dos óxidos, é análoga à descrita por ARAÚJO (2018) para a síntese de Carbetto de Molibdênio. Nesse processo, o óxido precursor é primeiro reduzido à fase metálica para, depois reagir e formar o carbetto em temperaturas mais altas. Como ilustrado na Figura 7, a 800 °C o Tungstênio metálico torna-se a fase majoritária (55%), indicando que o processo de redução está avançando significativamente. Dessa forma, os resultados aqui apresentados indicam fortemente que a síntese do Nitreto de Tungstênio segue um caminho análogo. Fica evidente que as temperaturas utilizadas foram eficazes para promover essa redução, mas insuficientes para ativar a etapa subsequente de nitretação do tungstênio metálico. Assim, se faz necessário, em estudo futuro, o ajuste dos parâmetros experimentais, principalmente o aumento de temperatura e de tempo de síntese, de modo a validar a hipótese de que a fase pura Nitreto de Tungstênio se sintetiza em temperaturas mais elevadas, seguindo o mesmo mecanismo da formação de carbetto de molibdênio.

Conclusão

Esse estudo investigou uma rota de síntese do Nitreto de Tungstênio, um dos metais de transição com capacidades catalíticas para reações importantes no processamento do hidrogênio na indústria. A investigação buscou estabelecer parâmetros de síntese viáveis para a obtenção da fase de nitreto, visando o desenvolvimento de materiais catalíticos eficientes e de menor custo em comparação com os metais nobres tradicionalmente utilizados. Se

baseando em estudos anteriores à respeito da síntese de materiais similares utilizados no mesmo campo: carbetos, também de metais refratários.

Os resultados obtidos mostraram uma evolução de fases cristalinas, à medida que as temperaturas de síntese aumentaram. Na condição reacional de menor temperatura (600°C), o material obtido foi o Óxido de Tungstênio (fase cristalina e tamanho de cristalito). Enquanto nas condições de 700°C de 800°C, os difratogramas mostraram a redução do óxido, formando Tungstênio metálico em ambas as temperaturas. Embora a fase desejada de Nitreto de Tungstênio ainda não tenha sido obtida, os resultados apresentados até agora são importantes para compreender o mecanismo da reação e indicam a necessidade de se estabelecerem outras condições operacionais mais severas na continuidade desse estudo.

Assim, a presente pesquisa estabelece uma base sólida para futuras tentativas de síntese do WN_x. Sugere-se, como próximos passos, explorar temperaturas de síntese superiores a 800°C, assim como tempos de patamar iguais ou superiores a 180 minutos. É possível que com esses ajustes nos parâmetros, seja possível a reação de nitretação, viabilizando a obtenção da fase de Nitreto de Tungstênio e permitindo a posterior avaliação de seu potencial catalítico.

Referências

Referências

- (1) IZHAR, S., & NAGAI, M. (2008). Cobalt molybdenum carbides as anode electrocatalyst for proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 182(1), 52–60.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.084>
- (2) Jiang, S. P. (2006). A review of wet impregnation - An alternative method for the fabrication of high performance and nano-structured electrodes of solid oxide fuel cells. *Materials Science and Engineering A*, 418(1–2), 199–210.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.11.052>
- (3) GRUPO DE ESTUDOS DO SETOR ELÉTRICO. A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. Rio de Janeiro: Gesel/UFRJ, 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf.
- (4) CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira. Brasília, DF: CNI, 2024. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/34/fc/34fc90b4-7c9d-4b5e-9769-1ac63ba9d891/id_247627_estudo_hidrogenio_sustentavel_interativo.pdf.
- (5) Rusman, N. A. A., & Dahari, M. (2016). A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(28), 12108–12126. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.244>
- (6) FRAUWALLNER, M. L., LINARES, F. L., ROMERO, J. L., SCOTT, C. E., ALI, V., HERNANDEZ, E., & ALMAO, P. P. (2011). Toluene hydrogenation at low temperature using a molybdenum carbide catalyst. *Applied Catalysis A: General*, 394(1–2), 62–70.
<https://doi.org/10.1016/j.apcata.2010.12.024>

- (7) Hou, R., Chang, K., Chen, J. G., & Wang, T. (2015). Replacing Precious Metals with Carbide Catalysts for Hydrogenation Reactions. *Topics in Catalysis*, 58(4–6), 240–246. <https://doi.org/10.1007/s11244-015-0365-1>
- (8) Prats, H., Piñero, J. J., Viñes, F., Bromley, S. T., Sayós, R., & Illas, F. (2019). Assessing the usefulness of transition metal carbides for hydrogenation reactions. *Chemical Communications*, 55(85), 12797–12800. <https://doi.org/10.1039/c9cc06084g>
- (9) VIEIRA, Janine Reginaldo Guimarães. Avaliação de catalisadores a base de carbeto e nitreto de molibdênio na obtenção de lactitol via hidrogenação da lactose. 2010. 132 f. Tese (Doutorado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- (10) ARAUJO, C. P. B. et al.. ON THE SYNTHESIS OF MOLYBDENUM CARBIDE WITH COBALT ADDITION VIA GAS-SOLID REACTIONS IN A CH₄/H₂ ATMOSPHERE. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 33, n. 3, p. 577–588, jul. 2016.

Anexos

Figura 1: Equação de Scherrer.

Figura 2: Difratoograma da amostra com temperatura de síntese 600°C.

Figura 3: Proporção das fases cristalinas obtidas na primeira amostra.

Figura 4: Difratoograma da amostra com temperatura de síntese 700°C.

Figura 5: Proporção das fases cristalinas obtidas na segunda amostra.

Figura 6: Difratoograma da amostra com temperatura de síntese 800°C.

Figura 7: Proporção das fases cristalinas obtidas na terceira amostra.

Figura 8: Relação de temperatura e proporção dos compostos obtidos.

CÓDIGO: ET1746

AUTOR: EMILLY SILVA ROSA

ORIENTADOR: LEONARDO ANDRADE DE ALMEIDA

TÍTULO: Investigando a composição atmosférica de exoplanetas do tipo Netuno com os satélites Kepler e TESS

Resumo

O estudo dos exoplanetas é uma área da Astronomia que tem crescido nas últimas décadas. A caracterização da atmosfera é fundamental para entendermos a formação, estrutura e a composição dos planetas descobertos fora do Sistema Solar. Neste contexto, realizamos neste trabalho um estudo dos exoplanetas do tipo Netuno, uma classe de planetas com raio entre $2-6 R_{\oplus}$ e a massa de $10-30 M_{\oplus}$. A partir da base de dados NASA Exoplanet Archive selecionamos uma amostra de sessenta e sete exoplanetas com estas características observados pelos satélites Kepler e TESS. No entanto, apenas sete planetas possuíam dados reduzidos de ambos os satélites. O objetivo principal deste estudo é comparar as profundidades dos trânsitos desta amostra medidas por esses satélites. Como o Kepler e o TESS operam em bandas espectrais distintas, é possível aplicar a técnica da espectroscopia de transmissão e medir possíveis variações na razão do raio do planeta pelo raio da estrela (R_p/R_*) entre as duas medições. Quando comparamos as medidas com modelos de atmosferas de exoplanetas do tipo Netuno, podemos identificar a existência de linhas de absorção associadas a moléculas de vapor d'água (H_2O) e átomos como Sódio (Na) e Potássio (K). A análise de sete exoplanetas da amostra, indicou que kepler-411 c apresentou uma profundidade de trânsito significativamente maior ($1\sigma-2\sigma$) nos dados do TESS quando comparado com o do Kepler, sinalizando a presença de moléculas de vapor de água na atmosfera deste exoplaneta.

Palavras-chave: Netuno. Exoplanetas. Atmosfera. Satélites. Kepler. TESS.

TITLE: Investigating atmospheric composition of Neptune-like exoplanets with Kepler and TESS data

Abstract

The study of exoplanets is an area of Astronomy that has grown in recent decades. The characterization of the atmosphere is fundamental to understand the formation, structure, and composition of planets discovered outside the Solar System. In this context, this work conducts a study of Neptune-like exoplanets, a class of planets with a radius between $2 - 6 R_{\oplus}$ and a mass of $10 - 30 M_{\oplus}$. From the NASA Exoplanet Archive database, we selected a sample of sixty-seven exoplanets with these characteristics observed by the Kepler and TESS satellites. However, only seven planets had reduced data from both satellites. The main objective of this study is to compare the transit depths of this sample as measured by these satellites. As Kepler and TESS operate in distinct spectral bands, it is possible to apply the transmission spectroscopy technique and measure possible variations in the planet-to-star radius ratio (R_p/R_*) between the two measurements. When we compare these measurements

with atmospheric models of Neptune-like exoplanets, we can identify the existence of absorption lines associated with water vapor molecules (H_2O) and atoms such as Sodium (Na) and Potassium (K). The analysis of the seven exoplanets in the sample indicated that Kepler-411 c showed a significantly greater transit depth ($1\sigma - 2\sigma$) in the TESS data compared to Kepler's, signaling the presence of water vapor molecules in this exoplanet's atmosphere.

Keywords: Neptune-like. Exoplanets. Atmosphere. Satellites. Kepler. TESS.

Introdução

Em 1995 foi descoberto o primeiro planeta extrasolar ao redor da estrela da sequência principal, nomeado 51 Pegasi-b [1]. Desde então, o estudo destes objetos é uma das áreas da Astronomia que mais tem crescido nos últimos anos. O feito foi tão importante que rendeu aos autores parte do Prêmio Nobel de Física em 2019. Menos de três décadas depois, já foram descobertos e confirmados mais de 5900 exoplanetas segundo o site da Nasa [2], isso tudo graças principalmente à missões espaciais como a CoRoT, Kepler e TESS.

Os exoplanetas possuem atmosfera que variam enormemente. A primeira detecção de uma atmosfera em um planeta extrassolar foi feita usando o satélite Hubble em 2002 [3]. Sua diversidade revela composições químicas e processos atmosféricos que, por vezes, não são vistos no nosso Sistema Solar, portanto, de suma importância para o estudo da formação e evolução dos planetas. Atualmente, existem muitos métodos para estudar as atmosferas exoplanetárias. Nesta pesquisa, usaremos a espectroscopia de transmissão. Esta técnica é aplicada quando o planeta passa na frente de sua estrela-mãe, ou seja, a luz da estrela que atravessa a atmosfera do planeta sofrem absorções por átomos e moléculas podem ser detectadas [4].

Os satélites Kepler e TESS são telescópios espaciais que foram lançados pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) cujo objetivo principal foi a busca por exoplanetas. O Kepler foi lançado em março de 2009 e operou até 2013, deixando um legado de 2600 planetas descobertos fora do sistema solar [5]. Para continuar a missão de busca por exoplanetas, no mês de abril de 2018 a NASA lançou o Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) ao espaço. Até então, o TESS encontrou 681 objetos confirmados, bem como 2100 candidatos à confirmar. Sua missão ainda está ativa, produzindo muitos dados de alta qualidade [6, 7].

Esses satélites disponibilizaram para a comunidade científica internacional uma quantidade de dados de exoplanetas com excelente qualidade, na forma bruta e reduzidos por processamento de dados. Com os dados reduzidos podemos estudar a variação fracional do raio planetário (R_p/R_*) correlacionado com o comprimento de onda, de modo que pode-se evidenciar diferenças significativas entre as observações entre os dois satélites. Estas diferenças são uma primeira aproximação do espectro de transmissão em banda larga que indicam implicações nas atmosferas destes exoplanetas. Das questões relacionadas com a presença de atmosferas de exoplanetas, o mais desafiador é a detecção de átomos e moléculas nesta camada, em particular as que apontam bioassinaturas, um sinal que indica a presença de vida em outro planeta [8].

Neste trabalho, propomos o estudo das atmosferas de uma classe de exoplanetas do tipo Netuno, classificados como semelhantes em tamanho a Netuno. Analisamos os trânsitos planetários já coletados pelos satélites Kepler e TESS. O objetivo é, então, verificar a existência de variações significativas na razão raio do planeta pelo raio da estrela (R_p/R_*) que indiquem absorções de átomos e moléculas nas atmosferas destes objetos. As descobertas

deste estudo podem aprofundar o nosso conhecimento sobre a diversidade atmosférica dos planetas extrasolares.

Metodologia

Para a execução dos objetivos deste trabalho, foram realizadas as seguintes etapas: (I) seleção da amostra dos exoplanetas; (II) coleta dos valores de (R_p/R_*) disponibilizados nas bases de dados; (III) análise estatística da variação entre os dados de (R_p/R_*) obtidos pelos satélites Kepler e TESS e (IV) criação dos modelos de atmosfera respectivos para cada exoplaneta.

Na primeira etapa (I), foi definida a amostra do nosso estudo. Para tanto, foi selecionado os exoplanetas do tipo Netuno observados pelos satélites Kepler e TESS e que possuem dados reduzidos. Os critérios para selecionar os exoplanetas do tipo Netuno foram: raio de 2 a 6 raios terrestres ($2 - 6R_{\oplus}$) [10] e a massa de 10 a 30 massas terrestres ($10 - 30M_{\oplus}$) [11]. Fixados estes critérios, a lista de exoplanetas foi filtrada do banco de dados NASA Exoplanet Archive [9], disponível em <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>.

A segunda etapa (II) consistiu em buscar informações destes exoplanetas utilizando dados públicos provenientes do Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST) do Space Telescope Science Institute (STScI). A consulta foi realizada diretamente no portal de exoplanetas do MAST disponível no site <https://exo.mast.stsci.edu>. A plataforma disponibiliza dados observacionais de ambos os satélites, incluindo as informações sobre o trânsito planetário, do qual podemos coletar o valor médio do R_p/R_* e o desvio padrão (σ) para cada objeto. Importante destacar que o exoplaneta precisa possuir os dados reduzidos do Kepler e do TESS disponíveis para baixar, alguns Netunos não possuem esses dados, reduzindo a nossa amostra para sete exoplanetas.

A terceira etapa (III) consistiu em comparar os valores das razões entre os raios do planeta e o raio da estrela mãe, aplicando uma análise estatística que determina se existe ou não uma variação significativa nas medidas. Os scripts para processamento dos dados foram desenvolvidos e executados no ambiente Anaconda, utilizando a linguagem de programação Python versão 3.11. Foi realizada a análise estatística das informações do Kepler e do TESS para o R_p/R_* a partir de uma distribuição Gaussiana padrão, a fim de verificar a significância da discrepância das frações dos raios a partir do desvio padrão das medidas dos satélites Kepler e TESS. A interpretação dos resultados é resumida em dois casos possíveis: (I) diferença entre 1σ e 2σ e (II) diferença menor que 1σ .

A quarta etapa (IV) foi gerar os modelos de atmosferas para cada objeto da lista. Foram criados a partir do algoritmo ExoCTK (Exoplanet Characterization Toolkit) [12], que implementa modelos de atmosfera de exoplanetas e está disponível no site <https://exoctk.stsci.edu/fortney> [13]. Foram inseridos os valores de temperatura, massa, raio do planeta e raio da estrela para gerar os dados da profundidade do trânsito em função do comprimento de onda. Com estes dados, geramos todos os gráficos dos modelos de atmosferas dos planetas da nossa amostra.

Resultados e Discussões

As análises foram executadas para a amostra de sete exoplanetas, detalhados na Tabela 1. Todos eles apresentaram resultados semelhantes para os modelos de suas respectivas atmosferas, em concordância com a literatura.

As atmosferas dos Netunos são a chave para entender estes objetos. Eles possuem uma característica denominada envelope de Hidrogênio e Hélio (H/He). A composição destes exoplanetas é dominada pela interação entre o núcleo de elementos pesados e este envelope gasoso [14]. O espectro de transmissão que estamos trabalhando está entre 400 nm e 1000 nm, de acordo com a banda de observação dos satélites Kepler (420 - 900 nm) [15] e TESS (600 - 1000 nm) [16] detalhados na Figura 1. Nesta região são encontrados nas atmosferas de Netunos assinaturas de absorção, principalmente, do vapor de água (H₂O), a molécula mais comumente detectada nas atmosferas destes exoplanetas [17]. Sua absorção varia de 940 nm a 1000 nm [8, 13]. A atmosfera de Netunos também apresenta absorção dos elementos químicos Sódio (Na) em aproximadamente 590nm e Potássio (K) em 765nm [13, 4].

A Figura 1 detalha a região em que os satélites observam em conjunto e a que observam de maneira individual. A Figura 2 detalha que o Kepler é capaz de identificar a presença de Na e K nas atmosferas dos exoplanetas de estudo e o TESS detecta a absorção do K e do H₂O e ainda cobre uma parte do Na. Estas informações, concluem que as diferenças medidas nos valores do R_p/R_* pelos satélites podem indicar a absorção de alguma destas moléculas ou átomos.

Feita a coleta dos valores do R_p/R_* para cada exoplaneta da Tabela 1 de cada satélite e gerado seus modelos de atmosferas planetárias, obtivemos sete modelos que relacionam o R_p/R_* com o comprimento de onda (λ) de operação dos satélites Kepler e TESS. A análise visual destes gráficos (Figura 3) detalha picos em determinados comprimentos de onda que podem indicar absorções gerados por átomos e moléculas em sua atmosfera.

A análise estatística dos dados revelou que um dos exoplanetas - Kepler-411 c - possui variação significativa em seu valor de R_p/R_* , podendo ser classificado no caso I, detalhado na Tabela 2.

Com o gráfico da Figura 4 e os valores da Tabela 2 em mãos podemos interpretá-los. Eles revelam uma diferença significativa entre as medições dos dois instrumentos, a faixa de alta probabilidade do Kepler (área cinza) possui pouca sobreposição com o valor central do TESS (representado em roxo) e vice-versa. É notável também que o valor medido pelo Kepler é menor do que o do TESS, então, podemos deduzir que há assinaturas no espectro de transmissão responsáveis por esta variação. Neste caso, especificamente, o satélite TESS detectou algo em sua faixa espectral que o Kepler não pôde indicar diretamente.

A Figura 5 detalha os valores do R_p/R_* medidos pelos satélites Kepler e TESS e o seu respectivo modelo de atmosfera. As barras horizontais do ponto que identifica o Kepler-411 c, representam o comprimento de onda de observação do satélite e a barra vertical detalha a incerteza associada a medida do R_p/R_* . É possível concluir que a atmosfera do Kepler-411 c apresenta evidências de vapor d'água (H₂O) em sua composição.

Para os outros seis exoplanetas os valores de R_p/R_* medidos pelo Kepler foram maiores daqueles medidos pelo TESS, caracterizando uma variação do tipo II dentre os casos

possíveis após a análise estatística detalhada na Tabela 3. Estes casos da Tabela 3 são aqueles que não apresentaram discrepância significativa em suas medições do R_p/R_* pelos satélites Kepler e TESS, logo, não há uma discordância estatisticamente significativa para as características atmosféricas dos alvos.

Conclusão

Esta pesquisa teve como objetivo principal comparar os trânsitos dos exoplanetas do tipo Netuno medidos pelos satélites Kepler e TESS, com a intenção de encontrar possíveis discrepâncias nas razões dos raios do planeta e sua estrela-mãe (R_p/R_*).

Para cumprir os nossos objetivos, utilizamos a técnica de espectroscopia de transmissão. Definimos os parâmetros da nossa amostra para os exoplanetas do tipo Netuno, buscamos os dados para restringir a nossa lista, onde as informações disponíveis foram coletadas e analisadas, a fim de comparar os valores do R_p/R_* de diferentes bandas espectrais dos satélites Kepler e TESS.

A análise estatística revelou que um exoplaneta (Kepler-411 c) apresentou variação significativa, entre 1σ e 2σ para o R_p/R_* medidos pelos satélites Kepler e TESS. Este resultado evidencia a presença de vapor d'água na atmosfera deste exoplaneta.

Verificou-se que essa diferença está correlacionada com a absorção de elementos químicos na região de observação apenas do TESS, uma vez que o valor obtido pelo TESS para o R_p/R_* foi maior do que o obtido pelo Kepler. Para os outros exoplanetas analisados, o valor obtido pelo Kepler foi maior do que o do TESS, mas, as diferenças entre estas medidas não foram significativas, classificadas como menores que 1σ .

As comparações dos resultados observacionais com os modelos de atmosferas obtidos a partir da plataforma ExoCTK, podem sugerir a presença de H_2O , K e Na. Há outros picos nas atmosferas que sugerem uma absorção não especificada na literatura. Em suma, esta pesquisa, apresentou resultados coerentes na caracterização de atmosferas de exoplanetas do tipo Netuno. A aplicação da análise utilizando os dados dos satélites Kepler e TESS, possibilitou um estudo mais amplo da janela de observação do espectro de absorção, contribuindo para a compreensão da composição atmosférica dos Netunos. A identificação de evidências da presença do vapor de água (H_2O) na atmosfera de Kepler-411 c ressalta a importância de observações em multibandas.

Uma limitação deste trabalho, foi a disponibilidade de documentos de dados dos satélites, fator este que restringiu a nossa amostra. Em pesquisas futuras, é importante continuar o estudo dos exoplanetas do tipo Netuno, aplicando esta metodologia a uma amostra maior de exoplanetas extraídos de outros métodos ou a utilização de futuros telescópios para investigar em outras regiões do espectro eletromagnético.

Referências

[1] MAYOR, Michel; QUELOZ, Didier. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *nature*, v. 378, n. 6555, p. 355-359, 1995.

[2] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Exoplanet Discoveries Dashboard. Disponível em: <https://science.nasa.gov/exoplanets/discoveries-dashboard/>. Acesso em: 22 ago. 2025.

- [3] CHARBONNEAU, David; et al. (2002). «Detection of an Extrasolar Planet Atmosphere». *The Astrophysical Journal*. 568 (1): 377–384. Bibcode:2002ApJ...568..377C. arXiv:astro-ph/0111544 Acessível livremente. doi:10.1086/338770
- [4] MADHUSUDHAN, Nikku. *Exoplanetary Atmospheres: Key Insights, Challenges, and Prospects*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 57, p. 617-663, 2019. DOI: 10.1146/annurev-astro-081817-051846.
- [5] NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). (s.d.). *Kepler - Universe Missions*. Obtido em 27 de agosto de 2025, de <https://www.jpl.nasa.gov/missions/kepler/>
- [6] NASA Science. (2025, 22 de maio). *TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)*. Obtido em 27 de agosto de 2025, de <https://science.nasa.gov/mission/tess/>
- [7] NASA Exoplanet Exploration. *TESS: Transiting Exoplanet Survey Satellite*. Disponível em: <https://exoplanets.nasa.gov/tess/>. Acesso em: 28/08/2025].
- [8] SCHWIETERMAN, Edward W. et al. *Exoplanet biosignatures: a review of remotely detectable signs of life*. *Astrobiology*, v. 18, n. 6, p. 663-708, 2018.
- [9] CHRISTIANSEN, J., McElroy, D., Harbut, M., Ciardi, D., Crane, M., Good, J., Hardegree-Ullman, K., Kesseli, A., Lund, M., Lynn, M., Muthiar, A., Nilsson, R., Oluyide, T., Papin, M., Rivera, A., Swain, M., Susemihl, N., Tam, R., Eyken, J. & Beichman, C. *The NASA Exoplanet Archive and Exoplanet Follow-up Observing Program: Data, tools, and usage*. *Planet. Sci. J.* 6, 186 (2025,8) DOI: 10.3847/PSJ/ade3c2
- [10] ROGERS, L. A. et al. *Formation and structure of low-density exo-Neptunes*. *The Astrophysical Journal*, v. 738, n. 1, p. 59, 2011. DOI: 10.1088/0004-637X/738/1/59.
- [11] SEAGER, S. and Deming, D., “Exoplanet Atmospheres”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 48, pp. 631–672, 2010. doi:10.1146/annurev-astro-081309-130837.
- [12] BOURQUE, M., Espinoza, N., Filippazzo, J., Fix, M., King, T., Martlin, C., Medina, J., Batalha, N., Fox, M., Fowler, J., Fraine, J., Hill, M., Lewis, N., Stevenson, K., Valenti, J. & Wakeford, H. *The Exoplanet Characterization Toolkit (ExoCTK)*. (Zenodo,2021,2), <https://doi.org/10.5281/zenodo.4556063>
- [13] FORTNEY, J. J. et al. *Transmission Spectra of Three-dimensional Hot Jupiter Model Atmospheres*. *The Astrophysical Journal*, v. 709, n. 2, p. 1396-1406, 2010. DOI: 10.1088/0004-637X/709/2/1396.
- [14] LOPEZ, Eric D.; FORTNEY, Jonathan J. *Understanding the Mass-Radius Relation for Sub-Neptunes: Radius as a Proxy for Composition*. *The Astrophysical Journal*, v. 792, n. 1, p. 1, 2014. DOI: 10.1088/0004-637X/792/1/1.
- [15] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). *The Kepler Space Telescope*. [S. l.]: Kepler/K2 Guest Observer Office, [s.d.]. Disponível em: <https://keplergo.github.io/KeplerScienceWebsite/the-kepler-space-telescope.html>. Acesso em: 21 jul. 2025.

[16] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). TESS Telescope Information. Greenbelt, MD: HEASARC, [s.d.]. Disponível em: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/teess/telescope_information.html. Acesso em: 21 jul. 2025.

[17] MACIEIRA, L. E. A. G. et al. An Explanation of the Gaps in the Kepler Distribution of Exoplanets. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, v. 503, n. 1, p. L11–L15, 2021. DOI: 10.1093/mnrasl/slab003.

Anexos

Figura 1- Regiões espectrais de observação dos satélites Kepler e TESS e o detalhamento de sua sobreposição.

Figura 2 - Posições das absorções do sódio (N), potássio (K) e vapor d'água (H₂O) sobrepostas as regiões espectrais de observação dos satélites Kepler e TESS.

Figura 3 - Modelos de atmosferas para os exoplanetas da Tabela 1 gerados com o ExoCTK.

Figura 4 - Análise estatística detalhada da distribuição de probabilidade do Kepler-411 c

Figura 5 - Espectro de absorção sintético de um exoplaneta do tipo Netuno gerado pelo ExoCTK, sobreposto com os valores de R_p/R_* obtidos com os dados dos satélites Kepler e TESS para o sistema Kepler-411c. Único com variação de 1σ - 2σ .

Tabela 1 - Amostra final com os 7 exoplanetas do tipo Netuno

Tabela 2 - Diferença entre as medidas de R_p/R_* do Kepler-411 c derivadas a partir dos dados dos satélites Kepler e TESS. Para este exoplaneta, os dados do TESS geraram um valor de R_p/R_* maior que os do Kepler.

Tabela 3 - Diferenças entre as medidas de R_p/R_* dos exoplanetas que obtivemos valores maiores para as medidas derivadas com os dados do Kepler comparados com os do TESS.

CÓDIGO: ET1754

AUTOR: LUIZ FELIPE OLIVEIRA DE MOURA

ORIENTADOR: TATIANA DE CAMPOS BICUDO

TÍTULO: UTILIZAÇÃO DA BORRA DE CAFÉ PARA O ABATIMENTO DE CONTAMINANTES AMBIENTAIS DECORRENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL

Resumo

Os impactos ambientais causados pelas indústrias têxteis, especialmente pela liberação de efluentes, têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis. Este estudo investigou o uso da borra de café como adsorvente natural para a remoção de corantes têxteis com diferentes características (ácido, disperso e reativo). A biomassa foi submetida à secagem a 110 °C (in natura) e modificações térmicas a 200 °C (ADS200), 300 °C (ADS300) e 400 °C (ADS400). As amostras foram caracterizadas por difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho (FTIR), análise termogravimétrica (TG/DTG), fluorescência de raios X (FRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise BET. Os estudos cinéticos foram avaliados com base nos modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, e as isotermas foram ajustadas aos modelos de Langmuir e Freundlich. Os resultados indicaram que os tratamentos térmicos alteraram a estrutura da borra, favorecendo a adsorção dos corantes selecionados. O modelo de pseudo-segunda ordem foi o que melhor representou os dados cinéticos, enquanto o modelo de Langmuir foi mais adequado para descrever o comportamento da adsorção. Os dados reforçam o potencial da borra de café termicamente modificada como um adsorvente natural, sustentável e eficiente para a remoção de poluentes em efluentes têxteis.

Palavras-chave: Borra de café; Efluentes têxteis; Adsorção; Corantes.

TITLE: Use of Spent Coffee Grounds for the Removal of Environmental Contaminants from the Textile Industry

Abstract

The environmental impacts caused by the textile industry, particularly the release of effluents, have driven the development of more sustainable technologies. This study investigated the use of spent coffee grounds as a natural adsorbent for the removal of textile dyes with different characteristics (acid, disperse, and reactive). The biomass was subjected to drying at 110 °C (in natura) and thermal modifications at 200 °C (ADS200), 300 °C (ADS300), and 400 °C (ADS400). The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TG/DTG), X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy (SEM), and Brunauer–Emmett–Teller (BET) surface area analysis. Kinetic studies were evaluated using pseudo-first-order and

pseudo-second-order models, and adsorption isotherms were fitted to the Langmuir and Freundlich models. The results indicated that thermal treatments altered the structure of the coffee grounds, enhancing the adsorption of the selected dyes. The pseudo-second-order model best represented the kinetic data, while the Langmuir model was more suitable for describing adsorption behavior. These findings highlight the potential of thermally modified spent coffee grounds as a natural, sustainable, and efficient adsorbent for the removal of pollutants in textile effluents.

Keywords: Coffee grounds; Textile effluents; Adsorption; Dyes.

Introdução

A poluição ambiental causada por efluentes industriais tem se intensificado nas últimas décadas, representando um dos maiores desafios para a sociedade contemporânea. Entre os setores mais impactantes, destaca-se a indústria têxtil, responsável pela liberação de corantes sintéticos e compostos químicos complexos que contaminam os recursos hídricos, comprometendo a qualidade da água e a sobrevivência de organismos aquáticos (ABNT NBR 16787, 2016; CONAMA nº 430/2011). A persistência desses corantes em águas residuais decorre de sua alta estabilidade química, toxicidade e baixa biodegradabilidade, tornando indispensável o desenvolvimento de alternativas eficientes e sustentáveis para o tratamento de efluentes.

Nesse contexto, destaca-se o interesse por tecnologias de baixo custo e ambientalmente corretas, com enfoque em rotas verdes que promovam a reutilização de resíduos e a redução de poluentes (Martini, 2009; Valadares, 2011). O Brasil, como maior produtor e consumidor mundial de café, gera anualmente milhões de toneladas de resíduos, especialmente a borra de café, subproduto abundante e frequentemente descartado sem aproveitamento econômico significativo (ABIC, 2023).

A borra de café apresenta composição rica em moléculas orgânicas e inorgânicas, incluindo lignina, celulose, hemicelulose, óleos e minerais, características que a tornam promissora para aplicações tecnológicas. Estudos têm demonstrado sua viabilidade como matéria-prima em processos de obtenção de biocombustíveis (Araújo, 2019; Hermann et al., 2019), além de ressaltar seu potencial como bioissorvente em sistemas de tratamento de águas contaminadas (Assis, 2022).

Considerando a elevada geração desse resíduo e a crescente demanda por soluções sustentáveis, seu uso como material adsorvente para a remoção de corantes da indústria têxtil surge como alternativa de grande relevância ambiental. A utilização da borra de café não apenas mitiga os impactos da poluição hídrica, mas também agrega valor a uma biomassa residual amplamente disponível, contribuindo para a economia circular e o fortalecimento do apelo ambiental das cadeias produtivas.

Portanto, o objetivo deste estudo consiste em avaliar a viabilidade do pó de café residual como adsorvente natural para corantes têxteis, explorando seu potencial de aplicação em filtros de baixo custo e alto impacto ambiental positivo.

Metodologia

MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 1 resume de forma geral o desenvolvimento deste trabalho, ilustrando as etapas experimentais realizadas, desde a preparação da matéria-prima até as análises de caracterização e avaliação da eficiência do adsorvente.

Matéria-prima

O resíduo de pó de café (borra) foi utilizado como adsorvente, tanto na forma natural quanto após tratamento térmico. O material foi obtido a partir do café comercial da marca Santa Clara extraforte (mistura de *Coffea canephora* e *Coffea arabica*).

Preparação do Adsorvente

Inicialmente, a borra de café foi submetida à secagem em estufa por 2 horas, em temperatura de 105–110 °C, até atingir peso constante. O material seco, de coloração marrom-clara e partículas uniformes, foi denominado ADSB (Figura 2).

Posteriormente, alíquotas de 10 g do material foram acondicionadas em placas de Petri, transferidas para cadinhos e submetidas à calcinação em mufla. Utilizou-se rampa de aquecimento de 15 °C a cada 10 minutos, até atingir as temperaturas finais de 200 °C, 300 °C e 400 °C. Os materiais obtidos foram identificados como ADS200, ADS300 e ADS400, respectivamente.

Preparação das Soluções dos Corantes

Foram selecionados três corantes de tonalidade azul, porém de classes distintas (Figura 3):

Azul Disperso ER 150% (Disperse Blue 106), Golden Tecnologia (A); Azul Turquesa BG-SG CONC (Reativo), Golden Tecnologia (B); Ácido Erionyl Marinho A-R (Acid Blue 113), Huntsman (C).

As soluções-estoque foram preparadas a 100 ppm, a partir da dissolução de 0,1 g de cada corante em 1000 mL de água destilada. Para os ensaios de cinética, foram utilizadas soluções diluídas a 50 ppm, obtidas a partir da solução-mãe.

Ensaio de Adsorção

Para os testes de cinética, cada ensaio utilizou 25 mL da solução do corante e 0,3 g de adsorvente. Considerando-se três corantes, quatro adsorventes e onze intervalos de tempo, foram preparadas 132 amostras.

As misturas foram submetidas à agitação em mesa orbital (Solar, modelo SL 280/DT) por intervalos de 5, 10, 15, 30, 45 minutos, 1, 2, 3, 6, 12 e 24 horas. Após a agitação, procedeu-se à separação sólido-líquido por filtração a vácuo, seguida de análise espectrofotométrica UV-Vis.

A varredura espectral foi realizada de 200 a 600 nm, com incrementos de 10 nm, permitindo identificar os comprimentos de onda de máxima absorção de cada corante.

Com base nos resultados cinéticos, foi definido o tempo ótimo de contato para os ensaios de isoterma. Para esse procedimento, foram utilizadas concentrações de 10 a 100 ppm

(incremento de 10 ppm), totalizando 120 amostras. O tempo de contato adotado foi de 6 horas.

Técnicas de Caracterização

Análise Termogravimétrica (TGA)

Realizada em triplicata, com rampa de aquecimento de 10 °C/min até 900 °C, mantida por 20 min na temperatura máxima. Utilizou-se atmosfera de nitrogênio e cadinho de platina.

Área Superficial Específica e Porosidade (BET)

As análises foram conduzidas em equipamento Micromeritics ASAP 2020 PLUS (Figura 4), utilizando argônio como adsorvato em meio de nitrogênio líquido. As amostras foram previamente secas a 110 °C, seguidas de degasificação (10 °C/min até 120 °C, por 3 h).

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises foram realizadas em dois equipamentos: HITACHI TM4000Plus (preliminares, magnificação 1000X) e ZEISS Auriga 40 MEV-FEG (análises finais). As amostras foram fixadas em fita de carbono e metalizadas com camada de ouro em metalizador BAL-TEC SCD 005.

Difração de Raios X (DRX)

As análises foram feitas em Shimadzu XRD-7000, com varredura de 1°/min, ângulo 2 θ de 10 –90°. Considerando a natureza lignocelulósica da biomassa, foram esperados picos de baixa intensidade.

Espectroscopia UV-Vis

As análises foram realizadas em espectrofotômetro Solar SL 180/DT, no intervalo de 200 a 600 nm, em varreduras de 10 nm.

Fluorescência de Raios X (FRX)

Utilizou-se espectrômetro Shimadzu EDX-720, disponível no LIME/DEMAT-UFRN.

Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Realizada em equipamento BRUKER FT-IR VERTEX 70, com faixa de 500 a 4000 cm⁻¹ e 16 varreduras por amostra, no LAMMEN/UFRN.

Resultados e Discussões

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nas análises dos adsorventes e adsorbatos, bem como suas características e desempenho, são apresentados e discutidos a seguir.

Caracterização Morfológica e Cristalográfica

A análise cristalográfica por DRX (Figura 5) foi realizada para identificar possíveis picos e estruturas cristalinas presentes nos adsorventes, bem como verificar alterações decorrentes do processo de calcinação. Os difratogramas das amostras ADSB, ADS300 e ADS400 indicaram materiais semi-amorfos, com picos característicos de materiais lignocelulósicos. Destaca-se o pico no plano (002) em aproximadamente 22° , correspondente à celulose cristalina, e outro em 16° (plano 101), relacionado à fração amorfa composta por hemicelulose, lignina, pectina e celulose amorfa.

Os picos observados em 44° , 65° e 78° provavelmente são decorrentes de impurezas, ou da reflexão da placa de alumínio utilizada nas análises. Verificou-se que o aumento da temperatura de calcinação provoca diminuição da intensidade dos picos entre 15° e 25° , sugerindo degradação térmica da celulose amorfa, enquanto as impurezas mostraram-se resistentes até 400°C .

Avaliação dos Adsorventes

A preparação dos adsorventes consistiu na secagem da borra de café em estufa e posterior calcinação em mufla, com massa inicial de 10 g para cada temperatura de calcinação. A diminuição da massa, apresentada na Tabela 1, está associada à volatilização de compostos orgânicos durante o aquecimento.

Termogravimetria (TGA)

A TGA da borra de café revelou três estágios distintos de perda de massa (Figura 6):

Até 115°C : perda de $\sim 3\%$, associada à evaporação de água e compostos voláteis. Próximo a $355,5^\circ\text{C}$: perda de 36% , devido à despolimerização de polissacarídeos e decomposição de óleos. Entre 700 e 900°C : degradação final, resultando em $\sim 3\%$ de cinzas.

Análise de Porosidade (BET)

A área superficial das amostras, apresentada na Tabela 2, foi baixa ($< 1,5\text{ m}^2/\text{g}$), com diâmetro de poros $< 2\text{ nm}$, indicando material microporoso. O volume total de poros foi inferior a $1\text{ cm}^3/\text{g}$. As isotermas do tipo I (Figura 7) confirmaram adsorção rápida em baixas pressões relativas, sugerindo predomínio da quimissorção.

Análise Espectroscópica (FTIR)

Os espectros de FTIR (Figura 8) indicaram a presença de grupos funcionais característicos de celulose, hemicelulose e lignina. A banda entre $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, presente no ADSB, corresponde a vibrações C-H de alcanos e alquilas, desaparecendo progressivamente após a calcinação devido à degradação da celulose amorfa. Outras bandas, como 1700 cm^{-1} (C=O) e 1300 cm^{-1} (C-H), demonstraram a resistência térmica de lignina até 400°C .

Composição Elementar (FRX)

A composição elementar dos adsorventes (Tabela 3) mostrou potássio como componente majoritário ($\sim 74\%$), seguido de cálcio ($\sim 12\%$), com pequenas quantidades de metais como ferro, cobre e prata. A presença destes elementos pode influenciar positivamente a adsorção, por interação com contaminantes orgânicos e inorgânicos, inclusive via processos redox.

Caracterização Morfológica (MEV-FEG e EDS)

As imagens de MEV-FEG (Figura 9) mostraram que o ADSB apresenta superfície relativamente preenchida, com poucas cavidades. A calcinação aumentou a porosidade progressivamente: ADS200 apresentou estrutura mais aberta; ADS300 exibiu crostas e redução de matéria orgânica; ADS400 apresentou superfície porosa e espaçada, favorecendo a adsorção.

O mapeamento elementar por EDS (Figura 10) confirmou predominância de carbono e oxigênio no estado natural, com destaque de outros elementos após a calcinação, refletindo a eliminação de compostos mais sensíveis à temperatura.

A composição elementar dos corantes sólidos (Tabela 4) revelou ausência de carbono no corante disperso e presença de alumínio no corante reativo, corroborando com a análise UV-Vis, que indicou diferença de interação dos adsorventes com os corantes.

Espectroscopia de Adsorção (UV-Vis)

A cinética de adsorção para o corante ácido (Tabela 5) mostrou aumento progressivo da eficiência com o tempo de contato. A ordem de desempenho dos adsorventes foi: ADS400 > ADS300 > ADSB > ADS200. Apesar de ADS400 apresentar maior adsorção, alguns pontos ultrapassaram 100%, provavelmente devido a limitações do equipamento. O ADS200 apresentou comportamento mais consistente, com menor variação ao longo do tempo, característica importante para processos industriais que exigem previsibilidade. Todos os adsorventes alcançaram eficiência final acima de 70%, tornando-os viáveis para a remoção de corante ácido.

Conclusão

CONCLUSÃO

O trabalho demonstrou que a borra de café, após processos de secagem, calcinação e caracterização, pode ser transformada em um adsorvente eficiente para a remoção de corantes têxteis, com resultados promissores para aplicações industriais e com forte apelo socioeconômico e ambiental.

Nos testes preliminares, utilizando análise de imagem por escala RGB e estereoscópio, o adsorvente obtido a partir da borra calcinada a 300 °C apresentou melhor desempenho. Entretanto, observou-se que a borra não calcinada (ADSB) influenciava na coloração da amostra, o que levou à necessidade de adotar análises complementares para validar a eficiência do material.

Com o emprego da técnica UV-Vis, foi possível ampliar a avaliação, incluindo diferentes tipos de corantes. O corante ácido apresentou maior eficiência de remoção, enquanto os corantes disperso e reativo tiveram adsorção inferior, porém ainda relevante. O ADS400 se destacou como o adsorvente mais eficaz, mantendo percentuais de remoção superiores a 70% após 24 horas de contato com o efluente. O estudo da cinética demonstrou que o processo de adsorção se torna mais linear após cerca de 6 horas, indicando o tempo ideal para o equilíbrio entre adsorção e eficiência.

As análises complementares, como FTIR, DRX e termogravimetria, confirmaram a presença de material lignocelulósico (celulose, hemicelulose e lignina) em todas as amostras, o que

contribui para a capacidade de adsorção tanto pela estrutura física (porosidade e área superficial) quanto pela presença de grupos funcionais (carboxílicos e hidroxílicos), capazes de interagir com corantes catiônicos e aniônicos.

Dessa forma, este estudo evidencia que a borra de café é uma matéria-prima viável para produção de adsorventes, promovendo o reaproveitamento de resíduos, reduzindo impactos ambientais e oferecendo uma alternativa sustentável para tratamento de efluentes industriais, com potencial de aplicação em escala industrial.

Referências

1. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Disponível em: bit.ly/CONAMA-001.
2. DIAS, G. M. Os objetivos de desenvolvimento sustentável instituídos pela ONU e a tributação ambiental na indústria têxtil. 2020. 59 f. Dissertação (Graduação em Direito) – Faculdade de Ciências Jurídicas e Sociais, Brasília, 2020.
3. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Brazil: Coffee Annual. 3 jun. 2024. Disponível em: bit.ly/USDA-Coffee. Acesso em: 25 mar. 2025.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ (ABIC). Indicadores da Indústria de Café 2023. 2023. Disponível em: bit.ly/ABIC-Indicadores. Acesso em: 25 mar. 2025.
5. MARTINS, Andressa Gomes; TOLEDO, Izadora Marques; FARIAS, Vera Lúcia da Silva. Os Impactos Ambientais Causados pela Indústria Têxtil. Revista Brasileira de Engenharia de Produção, v. 9, n. 2, 2019. Disponível em: [bit.ly/Impactos-Industria-Têxtil](http://bit.ly/Impactos-Industria-Texil).
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16787:2019 - Materiais têxteis - Segurança química em têxteis - Requisitos e métodos de ensaio. 2019. Disponível em: bit.ly/ABNT-NBR16787.
7. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Disponível em: bit.ly/CONAMA-430.
8. HARSANTO, B. et al. Sustainability innovation in the textile industry: a systematic review. Sustainability, v. 15, n. 2, p. 1549, 2023.
9. Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT). Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira. Disponível em: <https://www.abit.org.br/adm/Arquivo/Publicacao/120429.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2024.
10. ADANE, T.; ADUGNA, A. T.; ALEMAYEHU, E. Textile industry effluent treatment techniques. Journal of Chemistry, v. 2021, n. 1, p. 5314404, 2021.
11. OLIVEIRA, L. G. et al. Uma revisão do uso de processos oxidativos avançados para descoloração de águas residuais de efluentes. Revista Processos Químicos, v. 13, n. 26, p. 105-112, 2019.

12. ISLAM, T.; REPON, M.; ISLAM, T. et al. Impacto dos corantes têxteis na saúde e no ecossistema: uma revisão da estrutura, causas e soluções potenciais. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, p. 9207–9242, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24398-3>.
13. MARKARIAN, J. A diferenciação do produto impulsiona avanços em cores e efeitos especiais. *Plastics, Additives and Compounding*, v. 10, p. 16-19, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1464-391X\(08\)70054-0\[1\]](https://doi.org/10.1016/S1464-391X(08)70054-0[1]).
14. YOUSSEF, Z.; COLOMBEAU, L.; YESMURZAYEVA, N. et al. Nanopartículas sensibilizadas por corante para fotocatalise heterogênea: estudos de casos com TiO₂, ZnO, fulereno e grafeno para purificação de água. *Dyes and Pigments*, v. 159, p. 49-71, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.DYEPIG.2018.06.002>.
15. MAHURPAWAR, M. Efeitos dos metais pesados na saúde humana. *International Journal of Research - GRANTHAALAYAH*, v. 3, n. 9SE, p. 1-7, 2015. DOI: <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v3.i9SE.2015.3282>.
16. MIA, R. et al. Review on various types of pollution problem in textile dyeing & printing industries of Bangladesh and recommendation for mitigation. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, v. 5, n. 4, p. 220-226, 2019.
17. FUNG, P.C., HUANG, Q., TSUI, S.M., POON, C.S. Treatability study of organic and colour removal in desizing/dyeing wastewater by UV/US system combined with hydrogen peroxide. *Water Sci. Technol.* 40, 153–160, 1999.
18. KUMAR, P. S; SARAVANAN, A. Sustainable wastewater treatments in textile sector. In: *Sustainable fibres and textiles*. Woodhead Publishing, 2017. p. 323-346.
19. SATTAR, Anwar. Hydrogen Production from Biomass for Use in Solid Oxide Fuel Cells. 2015. Tese (Doutorado) - Universidade de Birmingham, Birmingham, 2015. Disponível em: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/6335/1/Sattar15PhD.pdf>.
20. SILVA, João Carlos. Avaliação do Uso de Resíduos Sólidos para a Remoção de Contaminantes em Águas Fluviais. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: bit.ly/3U5GFkz.
21. CABRAL, Giselle Santiago; LIMA, Raulino Ari Clecius de; VIDAL, Carla Bastos; MELO, Diego de Quadros; NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do. Adsorção em Leito Fixo: Aspectos Teóricos e Aplicações Ambientais. Disponível em: library.org.
22. INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). *Compendium of Chemical Terminology*. 3rd ed. International Union of Pure and Applied Chemistry, 2006. Disponível em: <https://goldbook.iupac.org/terms/view/M03853>

Figura 1 Fluxogramas do desenvolvimento do trabalho

Figura 2: Diferença entre o café úmido e seco;

Figura 3: Fórmula estrutural dos corantes utilizados no preparo das soluções: A) Azul Disperso ER 150%; B) Azul Turquesa BG-SG Concentrado (Reativo); C) Ácido Erionyl Marinho A-R.

Figura 4: Equipamento para realização da análise BET

Figura 5: Difrátogramas dos adsorventes ADSB (A), ADS300 (B) e ADS400 (C), obtidos por DRX

Tabela 1: Quantidade de cinzas produzidas (g) e temperatura (°C) durante a preparação dos adsorventes por calcinação em mufla;

Figura 6: Gráfico termogravimétrico da borra de café;

Tabela 2: Resultado da porosidade do adsorventes

Figura 7: Correlação entre a matéria adsorvida e a pressão durante a análise BET

Figura 8: Espectros de FTIR referentes às amostras do adsorvente: ADSB, ADS200, ADS300 e ADS400

Tabela 3: Composição química percentual dos adsorventes obtida por FRX

Figura 9: Imagens de MEV-FEG das amostras. A) ADSB, B) ADS200, C) ADS300, D) ADS400;

Figura 10: Mapeamento elementar dos adsorventes, obtido por EDS. A) ADSB; B) ADS200; C) ADS300; D) ADS400.

Tabela 4: Composição elementar dos corantes Ácido, Disperso e Reativo.

Tabela 5 Resultado da cinética de adsorção para o corante ácido.

Figura 11: Resultados da cinética de adsorção do corante ácido para os adsorventes. A) ADSB; B) ADS200; C) ADS300; D) ADS400.

CÓDIGO: ET1762

AUTOR: ADRIANO DE ARRUDA PEREIRA FILHO

ORIENTADOR: BRUNO MARQUES FERREIRA DA SILVA

TÍTULO: Detecção Autônoma de Extintores de Incêndio Utilizando YOLOv8 e ROS 2 em um Robô Móvel

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema robótico autônomo projetado para detecção e localização de extintores de incêndio em ambientes internos utilizando visão computacional e robótica terrestre. O sistema utiliza o algoritmo YOLO para detecção em tempo real dos extintores, aliado a sensores RGB-D para o mapeamento do ambiente via ROS 2. A arquitetura do sistema integra navegação autônoma e processamento de imagens, buscando garantir a conformidade com as normas técnicas de segurança contra incêndio do Rio Grande do Norte. O robô percorre as áreas internas, detecta os extintores e registra suas posições para verificar se estão instalados conforme as normas vigentes. Espera-se que essa solução automatize inspeções, reduzindo falhas humanas e aumentando a eficiência na manutenção preventiva dos equipamentos de combate a incêndio.

Palavras-chave: detecção de objetos; extintores de incêndio; ROS 2; navegação autônoma

TITLE: Autonomous Fire Extinguisher Detection Using YOLOv8 and ROS 2 on a Mobile Robot

Abstract

fg

Keywords: fgf

Introdução

A prevenção de incêndios é uma preocupação constante em ambientes institucionais, comerciais e industriais. Um dos elementos principais para garantir uma ação rápida contra o fogo é a correta localização dos extintores de incêndio. No entanto, essas verificações ainda são realizadas por pessoas e estão sujeitas a falhas humanas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020). De acordo com a Instrução Técnica nº 21/2022 do Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Norte (CBMRN), o procedimento estabelece que a distância máxima de percurso até o extintor seja de até 25 metros para áreas de risco leve, 20 metros para áreas de risco médio e 15 metros para áreas de alto risco (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE, 2022).

Com os avanços das tecnologias de robótica e inteligência artificial, torna-se possível desenvolver um robô autônomo equipado com uma câmera RGB-D, capaz de mapear o ambiente e verificar se os extintores de incêndio estão posicionados corretamente, conforme

as normas de segurança(CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE, 2022).

Sobre esse prisma, a pesquisa propõe o desenvolvimento de um robô terrestre com um sistema embarcado de visão computacional, utilizando o algoritmo YOLO(“You Only Look Once”)(REDMON et al., 2016), uma rede neural convolucional de detecção de objetos em tempo real, capaz de detectar múltiplos objetos com precisão.

A arquitetura do robô será baseada no ROS 2 (“Robot Operating System”), uma infraestrutura modular e de código aberto amplamente utilizada no desenvolvimento de sistemas robóticos. O ROS fornece as ferramentas adequadas para controle, navegação, comunicação entre nós, processamento de sensores e inteligência artificial. Para visualização do mapeamento e das detecções, será utilizada a ferramenta RViz, uma interface gráfica que permite exibir dados sensoriais (como nuvens de pontos, imagens e mapas) e representar a posição dos objetos detectados no ambiente em tempo real(QUIGLEY et al., 2009).

Metodologia

A primeira etapa consistiu no estudo aprofundado das tecnologias base: o sistema operacional para robôs ROS, fundamentado no trabalho de Quigley et al. (2009), com foco em sua versão mais recente, ROS 2, e o algoritmo de detecção de objetos YOLO, baseado na publicação de Redmon et al. (2016). A premissa do projeto foi utilizar a plataforma robótica TurtleBot 2 (CLEARPATH ROBOTICS; OPEN ROBOTICS, 2021). Contudo, por ser um robô antigo, ele não possui suporte nativo ao ROS 2. Diante disso, a primeira etapa prática consistiu em buscar e implementar uma adaptação de software compatível (SANTOS, 2021). Simultaneamente, foi realizada a busca por um dataset de imagens de extintores de incêndio (FIRE EXTINGUISHER DETECT DDY5C, 2024) para o treinamento da rede neural YOLOv8.

Na segunda etapa, para a integração do robô, foi encontrado um repositório com a adaptação do TurtleBot 2 para o ROS 2 no GitHub (SANTOS, 2021), a qual já foi implementada na estrutura base do robô. Adicionalmente, para o treinamento do modelo de detecção, foi utilizado um dataset da plataforma Roboflow, que fornece imagens já anotadas de extintores de incêndio em diferentes cenários (FIRE EXTINGUISHER DETECT DDY5C, 2024).

Na terceira etapa, foi realizada uma pesquisa nas normas técnicas do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio Grande do Norte. Nesta pesquisa, constatou-se que a distância máxima de caminhada até um extintor em caso de incêndio depende do nível de risco do local. A norma estabelece os seguintes critérios: a distância máxima é de 25 metros para áreas de risco leve; 20 metros para áreas de risco médio; e 15 metros para áreas de alto risco (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE, 2022).

Resultados e Discussões

O primeiro resultado obtido foi a correta integração da adaptação de software (SANTOS, 2021) no robô. A validação foi realizada através de comandos no terminal do ROS 2. Foram realizados testes nos quais o robô demonstrou ser capaz de se movimentar e fazer o mapeamento do ambiente com a câmera Azure Kinect 360.

Em paralelo, foi realizado o treinamento do modelo de detecção de extintores utilizando um dataset da plataforma Roboflow (FIRE EXTINGUISHER DETECT DDY5C, 2024). Os primeiros testes do modelo, realizados com mídias externas, não foram satisfatórios. Tal resultado indica a necessidade de um novo ciclo de treinamento, possivelmente com um aumento no conjunto de dados. A integração deste modelo ao sistema do robô ainda está em andamento, motivo pelo qual os testes de detecção com a câmera do dispositivo não puderam ser concluídos.

A próxima etapa planejada para este projeto é a conclusão da integração do modelo de detecção ao TurtleBot. Após essa fase, serão iniciados os testes práticos para validar a capacidade do robô em verificar se a instalação de extintores em um ambiente atende às distâncias de caminhada especificadas pelas normas de segurança.

Conclusão

O trabalho de pesquisa apresentado teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema embarcado em um robô móvel capaz de mapear e detectar extintores de incêndio, visando futuras verificações com base nas normas de segurança. Para alcançar esse objetivo, diversas etapas foram concluídas com sucesso: primeiramente, obteve-se êxito em utilizar o TurtleBot 2 com o atual ROS2 por meio de um software de adaptação; também foi treinado um modelo de visão computacional com YOLOv8; e, por fim, foi realizado o levantamento dos parâmetros normativos do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio Grande do Norte (2022), que servirão de base para a análise de conformidade.

Os resultados obtidos foram promissores. A principal contribuição deste trabalho comprova que é possível utilizar um hardware antigo com tecnologias de inteligência artificial atuais. A limitação no estágio atual da pesquisa é a ausência de um teste prático utilizando o modelo de detecção integrado ao robô.

Como trabalho futuro, propõe-se a finalização da integração do modelo YOLO ao sistema do TurtleBot. Assim que o sistema estiver funcionando corretamente, serão realizados testes em ambientes controlados. O objetivo será validar a capacidade do robô de identificar os extintores de incêndio e analisar a conformidade do local utilizando os parâmetros definidos pelo Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio Grande do Norte (2022).

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12693: Sistemas de proteção por extintores de incêndio. Rio de Janeiro, 2020.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE. Instrução Técnica nº 21/2022 – Extintores de Incêndio. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: https://sistemasbcm.rn.gov.br/sernten/webroot/downloads/ITs_2022/IT-21-2022.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

REDMON, Joseph et al. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION (CVPR), 2016, Las Vegas. Proceedings... Las Vegas, 2016. p. 779-788. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1506.02640>. Acesso em: 28 ago. 2025.

QUIGLEY, Morgan et al. ROS: an Open-Source Robot Operating System. In: ICRA WORKSHOP ON OPEN SOURCE SOFTWARE, 2009, Kobe. Proceedings... Kobe, 2009.

CLEARPATH ROBOTICS; OPEN ROBOTICS. TurtleBot 2. [S.l.], 2021. Disponível em:<http://www.turtlebot.com/turtlebot2/>. Acesso em: 30 ago. 2025.

SANTOS, Rinaldo dos. turtlebot2-ros2-azure-kinect. [S.l.], 2021. Repositório GitHub. Disponível em:<https://github.com/Rinaldots/turtlebot2-ros2-azure-kinect>. Acesso em: 30 ago. 2025.

FIRE EXTINGUISHER DETECT DDY5C. Fire Extinguisher Detect. [S.l.]: Roboflow, 2024. Dataset. Disponível em:<https://universe.roboflow.com/fire-extinguisher-detect-ddy5c/fire-extinguisher-detect>. Acesso em: 30 ago. 2025.

CÓDIGO: ET1794

AUTOR: GABRIEL TEIXEIRA DE SOUZA

COAUTOR: GABRIEL ALVES DE OLIVEIRA FONSECA

ORIENTADOR: ORIVALDO VIEIRA DE SANTANA JUNIOR

TÍTULO: Estudo de ferramenta para disponibilizar a visualização de dados educacionais na internet

Resumo

O foco dessa pesquisa é utilizar dados extraídos da plataforma LoP, uma ferramenta de avaliação com exercícios de programação para os estudantes, de modo que, a partir dos dados obtidos, seja possível avaliar o desempenho dos alunos através de um Dashboard utilizando o framework PlotlyDash que utiliza Python. O PlotlyDash é capaz de exibir gráficos e tabelas interativas trazendo uma melhor experiência para a visualização do Dashboard e permitindo uma melhor análise e detalhamento dos dados exibidos, em que pode ser realizado um deploy para que qualquer dispositivo com acesso a internet consiga acessar e visualizar os dados. Através dos dados exibidos no Dashboard, o intuito é que seja possível obter um melhor entendimento das listas utilizadas na disciplina Lógica de Programação e que a partir disso possam ser feitas alterações necessárias visando uma melhor adequação dos exercícios para os estudantes.

Palavras-chave: Dashboard. Visualização. Análise.

TITLE: Study of a tool for visualizing educational data on the internet

Abstract

The focus of this research is to use data extracted from the LoP platform, a tool with programming exercises for students, so that, based on the obtained data, it is possible to evaluate student performance through a dashboard using the PlotlyDash framework with Python. PlotlyDash is capable of displaying interactive charts and tables, providing a better experience for dashboard visualization and allowing for more detailed data analysis. Additionally, it enables deployment so that any device with internet access can view the data. Through the information presented in the dashboard, the goal is to achieve a better understanding of the exercise lists used in the Logic Programming course and, based on that, make necessary adjustments to improve the suitability of the exercises for students.

Keywords: Dashboard. Visualization. Analysis.

Introdução

O objetivo deste projeto de pesquisa é realizar um estudo de visualização de dados do desempenho de estudantes na Plataforma LoP, um ferramenta de avaliação com exercícios de

programação, com o intuito de obter uma análise mais detalhada das listas utilizadas para avaliar os alunos e de suas respectivas questões. A partir de técnicas de extração de dados, são coletados os dados do sistema LoP para que os arquivos extraídos sejam tratados e organizados para que possam ser utilizados na exibição de um Dashboard.

Com os dados devidamente coletados e exibidos no Dashboard, é possível realizar uma análise do desempenho dos alunos em determinadas listas de exercícios e em determinadas questões, permitindo entender quais questões os alunos sentem mais dificuldades para realizar, fazendo com que possa ser feito uma avaliação de quais alterações poderiam ser feitas para melhorar a eficiência do aprendizado dos estudantes. A proposta visa não apenas facilitar a análise do desempenho dos alunos, mas também oferecer subsídios para a reformulação das listas de exercícios, promovendo uma melhor adequação dos conteúdos às necessidades dos estudantes.

Metodologia

A principal abordagem aplicada foi com foco na análise de dados educacionais extraídos da plataforma LoP, utilizada na disciplina de Lógica de Programação. Inicialmente, foram coletadas informações referentes ao desempenho dos estudantes, como número de tentativas, acertos, tempo de resolução, etc. sobre as listas de exercícios. Esses dados foram organizados e tratados utilizando a biblioteca Pandas, que permitiu a manipulação eficiente dos arquivos nos formatos Excel (.xlsx) e arquivos separados por vírgulas (.csv).

Para a criação do Dashboard, foi utilizado um framework open-source chamado de PlotlyDash, que permite a visualização de gráficos de maneira interativa com visualizações dinâmicas, utilizando a linguagem Python. O dashboard foi estruturado para exibir gráficos de barras, linhas, entre outros, permitindo a análise detalhada do desempenho dos alunos.

A fim de tornar o Dashboard acessível remotamente, foi realizado o processo de deploy para que pudesse ser acessado a partir de qualquer dispositivo com uma conexão à internet. Inicialmente, foi feita uma hospedagem na plataforma Render, pois apesar de simples e não oferecer muitos recursos computacionais, ela é gratuita, o que permitiu testar o funcionamento da aplicação em um ambiente web. Posteriormente, visando maior escalabilidade e integração com outros serviços em nuvem, o projeto foi migrado para o Google Cloud Run, serviço que permite a execução em ambientes mais robustos, com gerenciamento automático de recursos e alta disponibilidade. Isso garantiu que qualquer dispositivo com acesso à internet pudesse visualizar os dados de forma segura e eficiente.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos se provaram satisfatórios, revelando padrões importantes sobre o comportamento e desempenho dos estudantes na disciplina de Lógica de Programação. O

gráfico de desempenho por turma mostrou que muitos alunos, principalmente nas últimas listas, desistem de realizar submissões, restando apenas em uma pequena parcela que continua realizando as submissões de maneira recorrente.

Outro ponto relevante identificado foi o padrão de submissões ao longo do tempo. A análise temporal mostrou picos significativos de envios concentrados no último dia do prazo de entrega, evidenciando uma tendência à procrastinação ou à realização das atividades de forma apressada, o que pode comprometer a qualidade do aprendizado. Isso reforça a ideia de que seja necessário tentar uma abordagem mais instigadora para evitar que alunos deixem para o último dia para entregar.

Além disso, observou-se uma discrepância entre a dificuldade real das questões e a percepção dos estudantes. Muitos marcaram exercícios classificados como “fáceis” ou “médias” como “difíceis”, o que pode indicar insegurança, falta de domínio dos conceitos básicos ou até mesmo problemas na clareza dos enunciados. Essa percepção equivocada pode impactar diretamente na motivação e no engajamento dos alunos com a disciplina e com a realização das atividades propostas.

Os resultados obtidos demonstram que o uso do dashboard não apenas facilita a visualização dos dados, mas também permite uma análise mais crítica e detalhada sobre o processo de aprendizagem da turma na disciplina. A partir dessas evidências, torna-se possível propor ajustes nas listas de exercícios, revisar conteúdos com maior índice de dificuldade percebida e adotar estratégias que promovam uma melhor gestão do tempo por parte dos estudantes.

Conclusão

Diante do exposto, foi observado que a partir da extração de dados da plataforma LoP e criação de um Dashboard interativo a partir dos dados extraídos, isso pode vir a se tornar uma maneira muito eficiente de avaliar o desempenho dos estudantes e utilizar como apoio para identificar padrões nas listas, fornecendo informações importantes em relação a dados obtidos e como eles podem ser utilizados para melhorar a maneira como é os alunos são avaliados e buscar maneiras mais eficientes de avaliação, evitando que alunos se sintam desmotivados em realizar as listas de exercícios.

Ao utilizar o framework PlotlyDash, com os dados extraídos, foi possível a construção do Dashboard capaz de apresentar dados de uma maneira clara, dinâmica e acessível. O processo de deploy realizado inicialmente na plataforma Render e posteriormente no Google Cloud Run garantiu a escalabilidade e a disponibilidade da aplicação, permitindo que seja possível acompanhar os dados em tempo real, a partir de qualquer dispositivo conectado à internet.

A partir dos resultados que foram obtidos, ficou evidente que há padrões de desempenho, dificuldades recorrentes e oportunidades de melhoria nas listas de exercícios utilizados na disciplina de Lógica de Programação. Com base nessas informações, torna-se possível promover ajustes pedagógicos mais assertivos, contribuindo para o aprimoramento do processo de aprendizagem.

Dessa forma, conclui-se que o uso de tecnologias de visualização de dados, aliado à análise educacional, é uma maneira promissora para fortalecer o âmbito acadêmico e personalizar o ensino de programação de uma forma mais eficaz.

Referências

PLOTLY. Dash Documentation & User Guide. Disponível em: <https://dash.plotly.com>.

PANDAS. Python Data Analysis Library. Disponível em: <https://pandas.pydata.org>.

NUMPY. NumPy reference — NumPy v2.3 Manual. Disponível em: <https://numpy.org/doc/stable/reference/index.html>.

VILELA NETO, Francisco de Assis; SILVA, Diogo Vinícius de Paulo da; PAZ, Hewerton Adão da; SILVA, Igor Rosberg de Medeiros; SANTANA JR., Orivaldo Vieira de. Sistema LOP: uma ferramenta para avaliação contínua em programação de computadores. In: ENCONTRO INTEGRADO DOS PROGRAMAS DE ENSINO, 2020, Natal. Anais [...]. Natal: UFRN, 2020.

Anexos

Submissões por Dia

Desempenho por Dificuldade

Tempo por Lista

Desempenho da Turma

CÓDIGO: HS0353

AUTOR: ERICA MIRANDA FREIRE

ORIENTADOR: ALEXSANDRO GALENO ARAUJO DANTAS

TÍTULO: Sarrasine: Análise de uma paixão efêmera como exemplo de Literatura de Complexidade.

Resumo

Este estudo analisa a obra *A Comédia Humana* de Honoré de Balzac, especificamente a novela *Sarrasine*, como exemplo de Literatura de Complexidade a partir do conceito Moriniano da palavra *complexus* “o que tece em conjunto”. Com o apoio de Barthes, analisa-se a estrutura simbólica do texto e as subjetividades em suas *lexias*, enquanto Jameson incentiva a leitura como ferramenta de reflexão para conhecer o passado e mitigar contradições históricas. Ao atravessar a obra, somos envolvidos na teia de significados que abrange dimensões ontológicas, hermenêuticas e filosóficas que Balzac constrói, envolvendo não só seus personagens, como ele mesmo e até o leitor. A trajetória do artista *Sarrasine* ao se apaixonar por *Zambinella* traz reflexões sobre a existência humana e a sua complexidade, sendo uma obra que transcende seu contexto original ao prever debates contemporâneos, como as armadilhas da psiquê humana e debates de gênero.

Palavras-chave: *A Comédia Humana*. Balzac. Literatura de Complexidade. *Sarrasine*

TITLE: *Sarrasine*: Analysis of a Fleeting Passion as an Example of Complex Literature.

Abstract

This study analyzes Honoré de Balzac's *La Comédie humaine*, specifically the novella *Sarrasine*, as an example of Literature of Complexity, drawing on Morin's concept of the word *complexus* "that which weaves together". With Barthes' support, the text's symbolic structure and the subjectivities within its *lexias* are analyzed, while Jameson encourages reading as a tool for reflection to understand the past and mitigate historical contradictions. Traversing the work, we are enveloped in a web of meanings encompassing ontological, hermeneutical, and philosophical dimensions that Balzac constructs, involving not only his characters, but himself and even the reader. The trajectory of the artist *Sarrasine*, as he falls in love with *Zambinella*, prompts reflections on human existence and its complexity, marking it as a work that transcends its original context by foreshadowing contemporary debates, such as the pitfalls of the human psyche and gender discussions.

Keywords: Balzac. Literature of Complexity. *Sarrasine*. The Human Comedy.

Introdução

A literatura, enquanto reflexo da complexidade humana, funciona como ferramenta de análise da sociedade. Ao longo do tempo, diferentes autores buscaram expressar as subjetividades de seu próprio tempo, tarefa que Balzac assumiu com afinco. Sua obra representa uma tentativa ambiciosa de registrar em palavras, especificamente através do romance, as marcas de sua época e da própria existência enquanto sujeito histórico. Portanto, enquadrando-se como exemplo de literatura de complexidade, conceituada por Galeno e Castro (2022) enquanto obra que engendra uma rede de personagens, conhecimentos, tramas e ações, e recupera o sentido etimológico de "complexus", se caracterizando por uma metodologia recursiva, hologramática e de religação dos conhecimentos, configurando um sistema de saber aberto e transdisciplinar

Sarrasine foi a obra escolhida para este estudo por se tratar de uma novela curta, escrita em linguagem direta, porém sem abrir mão da densidade subjetiva e da riqueza simbólica. A trama faz uso de uma revelação que, mais tarde, seria chamada de plot twist na cultura contemporânea, mas que Roland Barthes (1970) nomeia como enigma. Os enigmas atravessam o autor, os personagens e o leitor, este último, aliás, compreendido como cúmplice do discurso e da construção da narrativa.

Relembrando o papel da literatura como aquilo que nos transpassa, como propõe Jameson (1981), é possível pensar que “nada existe que não seja social e histórico – na verdade, tudo é, em última análise, político”. Para o autor, a literatura deve ser lida como um “ato socialmente simbólico”, um meio pelo qual sujeitos individuais “concebem ou imaginam sua relação vivida com realidades transpessoais, tais como a estrutura social, ou a lógica coletiva da História”. Assim, a interpretação política é concebida como o “horizonte absoluto de toda leitura e de toda interpretação”.

Morin, assim como Balzac, é um autor francês que se dedica a religar saberes fragmentados e resgatar o que parece perdido. Apesar da distância histórica, os dois dialogam ao promoverem a junção entre racionalidade e sensibilidade, entre conhecimento técnico e imaginação simbólica. Morin (2000) propõe “ligar, contextualizar e globalizar os saberes”, convergindo “as ciências naturais, as ciências humanas, a cultura das humanidades e a filosofia para a condição humana”. Em Sobre a Estética, convida a refletir sobre o sentimento estético como uma experiência de prazer e admiração que, quando atinge maior intensidade, se converte em maravilhamento (MORIN, 2017). Ele ressalta a necessidade de articular o prosaico e o poético da vida, reconhecendo que ambos são indissociáveis para a existência humana. Balzac, por sua vez, explora essas nuances na construção de seus personagens, evidenciando como o cotidiano trivial se entrelaça com a dimensão simbólica e poética de suas experiências.

Em uma época em que a informação é rápida e superficial, Balzac nos convida a olhar mais de perto aquilo que já está dado, a questionar o ordinário. Ele nos desestabiliza ao criar personagens complexos, que em certos momentos tomam atitudes questionáveis, tal como os humanos que nos cercam. A identificação ou o estranhamento gerado por esses personagens fazem com que vejamos neles pessoas reais, possíveis de encontrar em nosso cotidiano.

Ao considerar esses elementos ambíguos da narrativa, somos levados a repensar o romance entre Sarrasine e Zambinella sob uma outra ótica. Jameson afirma que “nunca realmente abordamos um texto de imediato, em todo o seu frescor como coisa-em-si-mesma. Em vez disso, os textos se nos apresentam como o ‘sempre-já-lido’” (JAMESON, 1981). Ou seja, nossa compreensão é mediada por camadas de interpretações anteriores e pelos nossos próprios hábitos de leitura. Por isso, nas ciências humanas, retomar textos como Sarrasine é

essencial não apenas para evitar a repetição dos erros do passado, mas também para exercitar o pensamento complexo e expandir as formas possíveis de leitura do mundo.

Metodologia

A presente pesquisa foi conduzida a partir da leitura atenta e sensível da novela *Sarrasine*, de Honoré de Balzac, acompanhada de outras obras do mesmo autor, com o intuito de desenvolver familiaridade com seu estilo narrativo e apreender os elementos recorrentes em sua construção literária. A imersão no universo balzaquiano serviu para refinar a percepção estética e simbólica diante dos cenários, personagens e conflitos que compõem suas narrativas, valorizando a experiência do leitor enquanto sujeito afetado pelas camadas profundas da linguagem e da sensibilidade humana.

A base teórica da análise foi fundamentada principalmente na obra *S/Z*, de Roland Barthes, que propõe uma leitura estruturalista a partir da divisão do texto em *lexias*: unidades de significação que permitem desmembrar e compreender os diferentes códigos presentes na narrativa. A metodologia proposta por Barthes, ainda que aplicada com liberdade interpretativa, serviu como ferramenta para o mapeamento de sentidos simbólicos, culturais e ideológicos contidos na obra.

Complementarmente, as contribuições de Fredric Jameson foram incorporadas a partir da leitura de *O Inconsciente Político*, no qual o autor sugere que “toda interpretação textual deve, em última instância, remeter à dimensão histórica e política da experiência” (JAMESON, 1981). Assim, a análise literária é expandida para além da estética, compreendendo o texto como um ato socialmente simbólico que reflete e refrata as contradições do contexto em que foi produzido. O olhar histórico, portanto, se torna indispensável para compreender a tensão entre os discursos da obra e os valores de sua época.

Durante o desenvolvimento do projeto, encontros com o grupo de estudos *Marginália* proporcionaram o compartilhamento de ideias, leituras e orientações coletivas. Tais momentos foram fundamentais para articular os conceitos de interdisciplinaridade e pensamento complexo presentes na obra de Edgar Morin, autor recorrente no grupo. Sua abordagem epistêmica, voltada à reintegração dos saberes fragmentados e à valorização da condição humana, influenciou a condução crítica do trabalho.

Por fim, este estudo assumiu uma perspectiva hermenêutica, em que a subjetividade sensível da pesquisadora se fez presente como instrumento de leitura do mundo e da literatura. Inspirada por autoras como bell hooks e Judith Butler, a análise partiu também de um posicionamento ético e afetivo diante das personagens, especialmente das figuras femininas presentes em Balzac, compreendidas não como arquétipos literários, mas como representações humanas atravessadas por suas histórias, dores e afetos.

Além das leituras acadêmicas, experiências pessoais, leituras literárias e reflexões poéticas também foram mobilizadas como parte do processo interpretativo, reconhecendo que todo ato de leitura é mediado por trajetórias subjetivas, culturais e históricas. A metodologia, portanto, integrou análise estrutural, crítica histórico-política e abordagem humanista, em diálogo constante com a complexidade proposta por Morin.

Resultados e Discussões

A história começa nos apresentando o narrador e a donzela a qual ele acompanha em um baile. Entre casais que aproveitam a festa e cochichos sobre a origem da riqueza da família Lanty, responsável pela festa, o narrador pondera sobre as dualidades ao redor. Balzac escreve detalhadamente suas reflexões acerca do movimento das árvores que assemelha-se ao de espectros fantasmagóricos e o borboletear das donzelas no meio do salão. De um lado, a beleza da vida em sua forma mais palpável, do outro, o medo fantasmagórico e fantasioso sobre a morte. Apesar dos devaneios, continua atento às conversas e acaba ouvindo especulações sobre os anfitriões. Há um misto de incredulidade e comédia quando as suposições variam desde a possibilidade de serem ciganos até assassinos. Expondo a hipocrisia da alta sociedade francesa quando comenta-se que a riqueza é suficiente para serem perdoados seja lá quais forem seus crimes.

Composta por quatro membros, a família Lanty também é usada para explorar dualidades. Enquanto mãe e filhos são descritos como belos, talentosos e cativantes, o pai é um homem feio, isento de habilidades sociais e que trata os outros de forma áspera. Há um quinto membro cujos convidados questionam se seria ou não da família; de aparência frágil e doente, assemelha-se a um espectro que causa repulsa e pena nos convidados e no leitor. Torna-se o novo alvo das suposições, alega-se que seja ele o verdadeiro dono da fortuna.

A donzela que acompanha o narrador é uma das pessoas que causa uma situação constrangedora ao idoso. Para amenizar o escândalo, seu acompanhante a leva até um local mais reservado em que possa descansar. No pequeno espaço, deparam-se com um quadro que resulta em mais dualidades; a admiração da Lady e o ciúmes do Narrador. Inspirado e disposto a prolongar a conversa, se oferece para ir até a casa dela no dia seguinte e contar a história da pintura. Atiçando sua curiosidade, junto com sua acidez em deixá-lo enciumado pelo resto da noite por não cumprir seu desejo imediatamente. Balzac capricha nos detalhes de seus personagens, todavia, é inegável que suas mulheres recebem uma atenção especial. Escritas como um rio, ondulam entre sensibilidade e astúcia. Doçura e dissimulação tornam essas mulheres objetos de admiração por serem tão amáveis mesmo com seus defeitos.

A segunda parte da novela nos apresenta finalmente o personagem que intitula a história, o artista rejeitado pelos pais e adotado por Bouchardon: Ernesto João Sarrasine. Fiquei surpresa nesta parte, pois, até este momento, estava crédula de que Sarrasine tratava-se de uma mulher, já que a maioria das novelas tem como título o nome de suas musas.

Feio e desinteressado pela vida social, seu único fascínio era a arte. Descobriu-se autodidata muito jovem. Ao longo da história, nomes importantes são citados, como o do próprio Bouchardon, Madame Pompadour, Diderot e Canova. Balzac dá um espaço para Sarrasine no mundo real ao lado de figuras históricas, mesclando ficção e realidade. Cativando a curiosidade do leitor para conhecer quem são essas pessoas, evidenciando que a literatura da complexidade exige que a testemunha da história seja uma criatura curiosa que busca o devir daquela existência.

Envolvido pela arte e disposto a ter seu nome ao lado de Bouchardon e de Michelangelo, partiu para a Itália. Certa noite, cedeu aos pedidos de seus colegas e se permitiu assistir uma apresentação no Théâtre d'Argentina. Sua vista é entorpecida e seus sentidos inebriados no momento em que as cortinas se levantam e conhecemos àquela que rouba seu coração; Zambinella.

Nesta cena, Balzac mostra seu talento para descrever os sentimentos de um homem apaixonado, pois, a descrição do amor à primeira vista que Sarrasine vive é tão arrebatadora que o leitor fica tentado a também se apaixonar pela musa.

O artista torna-se um excêntrico apaixonado, vivendo de forma quase devota por Zambinella a ponto de fantasiar um futuro ao seu lado mesmo só observando-a de longe. Tamanha foi sua dedicação em estar em todas as sessões da ópera em que ela se apresentou, que decorou suas medidas e a esculpiu em argila numa réplica fiel. Finalmente encontrara as proporções perfeitas que ele só achava em pedaços de outras mulheres. Qualquer gesto da mulher, por mais sutil que fosse, acendia em seu coração a chama da dúvida e ansiedade.

Através de uma aia, Zambinella é quem dá o primeiro passo nessa “relação”. A italiana, semelhante à Anna Karenina de Tolstói, é uma personagem descrita como alguém que não precisa de palavras para seduzir. Entre olhares sutilmente intensos e lábios que se retorcem delicadamente em um sorriso discreto, acende o âmagô esmorecido de Sarrasine, deixando-o de boca e coração aberto. O pobre apaixonado recebe um alerta para tomar cuidado, pois ela é protegida por um cardinal, como era comum na época que os artistas tivessem seus protetores. Não há medo que afaste-o, Sarrasine está disposto a levar esse amor até o fim, mesmo que tenha que morrer.

Mas será que está mesmo?

Existe algo mais humano do que se apaixonar por alguém que estava diante dos seus olhos, e ainda assim se decepcionar? Entranhado na paixão, sempre haverá um resquício de decepção. Seja por um gesto, uma fala, um olhar ou ausência. Ausência do que é desejado e não realizado. Do gosto que a vida tem quando se está apaixonado. Da vastidão de possibilidades que a véspera de um relacionamento oferece. A dúvida do que vem depois pode ser angustiante ou proveitosa, depende do ponto de vista.

Não sei se Sarrasine preferiria ter vivido sua ilusão ao invés do curtíssimo tempo que pôde aproveitar ao lado da sua amada. Tenho minhas dúvidas quanto à veracidade da sua paixão, a qual ele intitulava de amor. Quanto à Zambinella, não duvido do afeto que sentia, visto que alertou que ela podia não ser o que ele esperava. Pois, após uma curta aventura amorosa em que puderam aproveitar a companhia um do outro como dois enamorados, Sarrasine vê seu mundo cair ao testemunhar que a dama não mentiu quando falou que não era mulher. Irado, tenta matar a (ou o?) pobre Zambinella, mas os mandados pelo cardinal chegam primeiro e a salvam.

Ao fim do relato do Narrador, a marquesa se queixa que não encontrou Marianina nem o velhinho na história. Sorridente, ele revela que o velhinho era ninguém mais que Zambinella, tio-avô de Marianina.

Inicialmente me perguntei se esse segredo precisava mesmo ser guardado com tanto afínco. Afinal, a elite parisiense era tão hipócrita quanto permissiva: perdoaria qualquer desvio, desde que os Lanty tivessem como pagar por ele. Mas percebi que, para além do poder do dinheiro, havia algo que nem mesmo o capital podia apagar — o olhar condenatório da sociedade. A família tentou proteger Zambinella não só de seu passado, mas da exposição de uma identidade dissonante, marcada por dores que nem o tempo cicatriza. Morin nos lembra que a complexidade humana não se reduz a uma lógica binária: esconder é também proteger, às vezes amar é encobrir o que o mundo insiste em rejeitar.

A figura de Sarrasine me lembra a de um homem hétero que se apaixona por uma mulher trans: ele vê nela tudo o que sua fantasia construiu como feminino, mas ao ser confrontado com a realidade do corpo, entra em colapso. Butler fala que o gênero é uma performance reiterada, não uma essência — e Sarrasine se apaixona pela performance, mas não suporta a quebra da ilusão. Zambinella, por sua vez, parece genuinamente tocada por ele. A violência que sofreu não apaga os momentos em que se sentiu amada. E é aí que entra bell hooks: amor não é só afeto, é cuidado, é compromisso com o bem-estar do outro. Sarrasine falhou miseravelmente nesse ponto. Ele não soube amar, só idealizar.

Zambinella vivia em uma pobreza que ia além do material — era a escassez de escolha, de liberdade, de reciprocidade. Barthes nos mostra em *S/Z* que o texto é um campo de forças simbólicas, e aqui Zambinella encarna um sujeito despossuído de agência, preso ao papel que lhe foi imposto: o de objeto de desejo e não sujeito do próprio desejo. Sua infelicidade talvez não esteja na castração em si, mas no momento em que percebeu que o afeto que recebia vinha com prazo de validade. Sarrasine não a amava como ela era, mas como queria que fosse. E quando essa imagem ruiu, o amor virou ameaça.

Mas o afeto pode se reconfigurar. A relação com Marianina, ainda que silenciosa, parece carregada de ternura. Talvez ela não saiba de tudo, mas compreenda o suficiente: que aquele velhinho carrega um fardo imenso e precisa mais de acolhimento do que de julgamento. Jameson afirma que toda narrativa está imersa em ideologias, e essa compreensão que surge na margem da história revela uma contraideologia do cuidado. Em vez do espetáculo da tragédia, temos ali um respiro — um amor discreto, mas real.

A dinâmica entre Zambinella e Sarrasine me lembrou Clementine e Joel em *Brilho Eterno de Uma Mente Sem Lembranças*. Não porque Zambinella fosse impulsiva, mas porque, como Clem, ela tenta alertar: “eu não sou o que você projeta”. Barthes já dizia que o leitor idealiza tanto quanto o escritor; aqui, o amante idealiza tanto quanto o amado. Sarrasine cria uma ficção, e quando confrontado com a realidade, responde com destruição. Zambinella, ao contrário, tenta lidar com o sentimento — hesita, resiste, mas se deixa afetar. O desejo por um amor possível é real, mesmo que sabotado pela estrutura que os cerca.

Amar alguém que não te vê por inteiro é cruel. E Zambinella quis esse amor. Ela se sentiu segura na masculinidade gentil de Sarrasine, talvez pela primeira vez. Mas amor sem escuta é só delírio. E quando tudo desmorona, resta o trauma. Essa reviravolta brutal, da paixão à tentativa de homicídio, parece coisa de roteiro ruim — ou de diagnóstico psiquiátrico. Confesso que, com minha suspeita de borderline, entendo bem a fúria da rejeição. Mas uma coisa é certa: a reação de Sarrasine é inaceitável. hooks defende que o verdadeiro amor se baseia na escolha de não ferir o outro. Ele escolheu o contrário.

Talvez o problema não tenha sido Zambinella ser homem, mas todos saberem que ela era. O amor de Sarrasine só valia na clandestinidade. Butler nos ajuda a entender que é a norma que exige coerência entre corpo, desejo e identidade. A revelação pública da incoerência é o que desestrutura Sarrasine, não o afeto em si. O amor vira vergonha. E aqui, novamente, a crítica à heteronormatividade se impõe: é a sociedade que produz os monstros que depois ela mesma rejeita.

Não duvido que a aparência frágil de Zambinella no presente seja resultado do trauma, não da idade. Jameson nos lembra que as marcas da história se inscrevem nos corpos e nas subjetividades. Se Zambinella se sente culpada ou aliviada com a morte de Sarrasine, só ela

sabe. O que importa é que sobreviveu. E sobreviveu sendo quem era — não quem esperavam que fosse.

O que me prende a essa personagem é justamente sua humanidade. Ela não é fria. Ela não é manipuladora. Ela tentou avisar. E se deixou tocar. Zambinella desejava amar e ser amada de volta. Mas a realidade foi mais dura. O mundo não estava pronto para aquele tipo de afeto. Sarrasine também não. Ele poderia ter fugido, recomeçado, amado de verdade. Mas preferiu destruir.

E, por fim, quem é esse narrador? Como sabe tanto? Ele estava lá? Ou tudo isso é só um teatro para impressionar a marquesa? A dúvida é legítima — e Barthes diria que o texto mente. A história pode ser inventada, distorcida, manipulada. Mas mesmo como fábula, ela carrega verdades sobre uma sociedade que rejeita o diferente enquanto finge civilidade. Balzac sabe disso. Por isso sua crítica é ácida. E por isso a marquesa odiou a história: ela percebeu que aquela violência simbólica ainda está viva — e muito mais próxima do que gostaria de admitir.

Conclusão

A análise de Sarrasine revela que a narrativa de Balzac transcende uma simples trama romântica para se configurar como um tecido denso de relações simbólicas, sociais e existenciais. O confronto entre Sarrasine e Zambinella, atravessado por temas como identidade de gênero, performance e amor, desvela camadas profundas de tensão entre desejo, ilusão e verdade. A leitura sob a de Judith Butler permite compreender a figura de Zambinella como expressão da performatividade do gênero, enquanto bell hooks evidencia como as relações amorosas se enredam em estruturas de poder e rejeição. Por sua vez, Roland Barthes, em sua desmontagem minuciosa do texto, mostra que a obra opera por códigos narrativos e simbólicos que se entrelaçam de forma rizomática, revelando sentidos múltiplos e instáveis. Já Fredric Jameson aponta como a narrativa atua como ato socialmente simbólico, inscrito em um contexto histórico e ideológico, enquanto Edgar Morin fornece a base para reconhecermos a interconexão de todos esses elementos como um todo complexo. Dessa forma, Sarrasine pode ser entendida como um paradigma da literatura de complexidade: uma obra que articula, em sua estrutura e em seu conteúdo, múltiplos níveis de leitura, abrindo espaço para interpretações que dialogam com questões estéticas, éticas, políticas e epistemológicas, permanecendo viva e provocadora para além de seu tempo.

Referências

BARTHES, Roland. **S/Z**. Paris: Seuil, 1970.

BUTLER, Judith. **Problemas de Gênero: Feminismo e Subversão da Identidade**. Tradução de Renato Aguiar. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2003.

HOOKS, bell. **Tudo sobre o amor: novas perspectivas**. Tradução de Stephanie Borges. São Paulo: Editora Elefante, 2021.

GALENO, Alex; CASTRO, Gustavo. **Balzac and the Literature of Complexity**. Global Journal of Human-Social Science: A Arts & Humanities - Psychology, Volume 22, Edição 6, Versão 1.0, 2022.

JAMESON, Fredric. **O Inconsciente Político: A Narrativa como Ato Socialmente Simbólico**. Ithaca: Cornell University Press, 1981.

MORIN, Edgar. **A cabeça bem-feita: repensar a reforma, reformar o pensamento**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

MORIN, Edgar. **Sobre estética**. Rio de Janeiro:Edições Pró-Saber. 2017

CÓDIGO: HS0498

AUTOR: NATHALIA SOARES MENDES

ORIENTADOR: MARCELA APARECIDA CUCCI SILVESTRE

TÍTULO: Tradução do capítulo 4 de “Borderlands/ La Frontera – the new mestiza”, de Gloria Anzaldúa

Resumo

Este relatório discute a tradução do capítulo 4 de *Borderlands/La Frontera: The New Mestiza* (1987), de Gloria Anzaldúa, para o português. Reconhecida como marco nos estudos feministas, chicanos e decoloniais, a obra articula ensaio, poesia, narrativa autobiográfica e reflexão teórica, caracterizando-se pelo hibridismo linguístico em inglês, espanhol e nahuatl. Considerando sua baixa circulação no Brasil, a tradução busca ampliar o acesso de pesquisadoras brasileiras e latino-americanas ao pensamento de Anzaldúa, inserindo-o no debate da crítica literária e dos feminismos interseccionais. Fundamentada nos Estudos Feministas da Tradução (Simon, 1996; Flotow, 1997), na crítica de Arrojo (1994, 1998) e na noção de visibilidade do tradutor de Venuti (1995), a pesquisa assumiu uma postura interventiva. As estratégias tradutórias incluíram: priorização do feminino em relação ao masculino, questionando a gramática patriarcal do português; preservação de trechos em espanhol e nahuatl, a fim de manter o caráter fronteiriço da obra; e escolhas lexicais que enfatizam a corporalidade e a experiência feminina. Exemplos analisados demonstram que traduzir Anzaldúa é reinscrever discursos insurgentes, problematizar estruturas normativas da linguagem e afirmar a tradução como ato político. Mais do que transportar significados, o trabalho propõe a inserção da autora no cânone crítico brasileiro, fortalecendo alianças epistemológicas e políticas em torno dos feminismos decoloniais.

Palavras-chave: Tradução feminista; Gloria Anzaldúa; Linguagem inclusiva.

TITLE: Tradução de “Borderlands/ La Frontera – the new mestiza”, de Gloria Anzaldúa

Abstract

This report discusses the translation of Chapter 4 of *Borderlands/La Frontera: The New Mestiza* (1987), by Gloria Anzaldúa, into Portuguese. A landmark in feminist, Chicana, and decolonial studies, the book combines essay, poetry, autobiographical narrative, and theoretical reflection, characterized by its linguistic hybridity in English, Spanish, and Nahuatl. Given its limited circulation in Brazil, this translation aims to broaden access for Brazilian and Latin American researchers, situating Anzaldúa’s thought within feminist literary criticism and intersectional feminisms. Grounded in Feminist Translation Studies (Simon, 1996; Flotow, 1997), Arrojo’s critique (1994, 1998), and Venuti’s notion of translator’s visibility (1995), the project adopted an interventionist stance. Translation strategies included prioritizing feminine over masculine forms, thereby challenging Portuguese’s patriarchal grammar; preserving Spanish and Nahuatl passages to maintain the text’s borderlands character; and choosing terms that emphasize women’s corporeality and

experience. The analyzed examples reveal that translating Anzaldúa means reinscribing insurgent discourses, questioning normative linguistic structures, and reaffirming translation as a political act. More than transferring meaning, this work inscribes Anzaldúa in Brazilian critical debates, contributing to epistemological and political alliances within decolonial feminisms.

Keywords: Feminist translation; Gloria Anzaldúa; Inclusive language.

Introdução

A obra *Borderlands/La Frontera: The New Mestiza* (1987), da escritora, teórica e ativista chicana Gloria Evangelina Anzaldúa (1942–2004), é marco nos estudos feministas, étnicos e decoloniais. Escrita em contexto de marginalização das mulheres latinas nos EUA, articula poesia, ensaio, narrativas autobiográficas e reflexões teóricas, configurando-se como texto híbrido em gênero e linguagem. O uso simultâneo de inglês, espanhol e nahuatl não é apenas estilístico, mas afirma política da identidade mestiça e insurgente da autora. A escrita é gesto de resistência e autodefinição: “Por que sou levada a escrever? Porque a escrita me salva da complacência que me amedronta. Porque não tenho escolha. Porque devo manter vivo o espírito de minha revolta e a mim mesma também. Porque o mundo que crio na escrita compensa o que o mundo real não me dá. No escrever coloco ordem no mundo, coloco nele uma alça para poder segurá-lo. Escrevo porque a vida não aplaca meus apetites e minha fome. [...] Finalmente, escrevo porque tenho medo de escrever, mas tenho um medo maior de não escrever” (Anzaldúa, 1981, p. 232). Para Anzaldúa, escrever não é mero exercício estético, mas condição de sobrevivência e afirmação diante do apagamento social, convertendo-se em espaço de contestação e reinscrição de si e de sua comunidade. O conceito de mestiza consciousness traduz viver entre línguas, culturas e sistemas de poder, denunciando violência colonial e patriarcal e celebrando a potência criativa do entre-lugar. *Borderlands* é visto como “a tentativa de Anzaldúa de ir mais além do feminismo da diferença do início dos anos 1980, das abstrações desconstrucionistas ou sinais da diferença pura de algumas vertentes pós-estruturalistas, para um escrutínio (geo)político das mestiçagens e hibridismos presentes na explosiva zona de contato que caracteriza a fronteira entre México e Estados Unidos” (Costa; Ávila, 2005, p. 693). A nova mestiça, com consciência polivalente e escrita performática, habita os entre-lugares das diferenças, revelando desequilíbrios históricos e exclusões. *Borderlands* é obra cuja tradução vai além da transposição linguística: é inscrição política e epistêmica. No Brasil, apesar da ampla citação, não há tradução completa para o português, representando lacuna editorial e barreira epistemológica. A tradução parcial do capítulo 4 busca preencher essa lacuna, colocando Anzaldúa em diálogo com a crítica literária feminista. O trabalho justifica-se em três dimensões: acadêmica, ao ampliar textos para crítica feminista, tradução e teoria decolonial; política, ao inscrever no português texto que questiona estruturas patriarcais, coloniais e cisheteronormativas; pedagógica, ao promover reflexão sobre tradução como prática de ensino-aprendizagem e resistência. Traduzir não é exercício neutro de correspondência. Como lembra Arrojo (1998, p. 26), desde os anos 1980 a noção de tradução deslocou foco da fidelidade linguística para consequências ideológicas e políticas do ato tradutório. Traduzir é lidar com sentidos que circulam entre doméstico e estrangeiro, entre tradutora e autora, revelando tensões de poder. Venuti (1995, p. 14) propõe o conceito de “invisibilidade do tradutor”, denunciando ideologia de transparência que buscou apagar agência da tradutora. As canadenses Sherry Simon (1996) e Luise von Flotow (1997) radicalizaram a crítica, defendendo prática tradutória marcada por intervenção e subversão de sentidos, chamada Tradução Feminista. Flotow (1997, p. 398) destaca que traduzir pode ser ato político de

reinscrição textual, evidenciando vozes silenciadas e reescrevendo relações de poder na língua de chegada. A tradução do capítulo 4 inscreve-se nos Estudos Feministas da Tradução, compreendendo o português como espaço de disputa ideológica, adotando postura crítica capaz de questionar normas da língua e abrir caminhos para expressão mais inclusiva, alinhada à perspectiva de Costa e Alvarez (2013, p. 27).

Metodologia

O processo tradutório adotado neste trabalho desenvolveu-se em três etapas principais: preparação teórica, execução da tradução e análise crítica das escolhas realizadas. Na fase preparatória, foi conduzida uma revisão bibliográfica que buscou articular três eixos fundamentais. O primeiro refere-se à crítica literária feminista, a partir de autoras como Elaine Showalter (1994), que defende uma abordagem crítica centrada na experiência da mulher escritora, e Gerda Lerner (2019), que historiciza a construção patriarcal da opressão de gênero. O segundo eixo abrange os estudos da tradução, com destaque para as reflexões de Paulo Henriques Britto (2012), que problematiza a noção de fidelidade; de Rosemary Arrojo (1994; 1998), que enfatiza a dimensão cultural e política do ato tradutório; e de Lawrence Venuti (1995), que denuncia a invisibilidade do tradutor. O terceiro eixo é o da tradução feminista, representado por autoras como Sherry Simon (1996) e Luise von Flotow (1997), cujas propostas incluem estratégias de intervenção consciente no texto original, como o uso de glosas, o destaque de termos relacionados ao corpo feminino e a inversão da hierarquia de gênero. Esse levantamento teórico constituiu a base para a formulação dos critérios que orientaram todo o processo tradutório. A etapa seguinte correspondeu à execução da tradução do capítulo 4 da primeira edição de 1987. Foram utilizados glossários bilíngues, dicionários online e softwares de apoio à tradução, embora o aspecto técnico tenha sido subordinado às escolhas políticas e estéticas. Entre as estratégias adotadas, destaca-se, em primeiro lugar, a preservação do hibridismo linguístico: os trechos em espanhol e nahuatl foram mantidos no texto traduzido, com notas explicativas quando necessário. Essa decisão buscou respeitar a heterogeneidade da obra e reforçar o caráter fronteiriço da escrita de Anzaldúa. Além disso, optou-se por priorizar o feminino sempre que a gramática da língua portuguesa exigia uma forma de gênero, seja colocando-o em primeiro lugar (“as escritoras e escritores”), seja enfatizando-o isoladamente em oposição ao masculino genérico. Também se recorreu, em determinados trechos, à subversão da gramática normativa, tensionando a norma culta do português como forma de evidenciar a língua enquanto instrumento social patriarcal e cis-hetero-normativo. Por fim, a análise crítica das escolhas constituiu um exercício contínuo ao longo de toda a prática tradutória. Cada decisão foi registrada e justificada de modo a evidenciar seus efeitos de sentido. Assim, por exemplo, o termo alien foi traduzido por “alienígena”, de modo a acentuar a condição de estranhamento radical, evitando termos mais domesticados como “estrangeira”. A palavra rajadura, por sua vez, foi vertida como “fenda” ou “corte”, privilegiando suas conotações de ferida, ruptura e abertura, em vez de atenuar seu impacto. Também nos pronomes coletivos optou-se por priorizar a forma feminina, como em “elas” em lugar de “eles”, contrariando a norma tradicional do português e reforçando a inscrição feminista no texto.

Resultados e Discussões

Os resultados do processo tradutório aqui apresentados evidenciam que a tradução de *Borderlands/La Frontera: The New Mestiza* (1987), de Gloria Anzaldúa, não pode ser

compreendida como uma mera operação linguística de transposição entre códigos. Desde os primeiros movimentos tradutórios, tornou-se evidente que a obra desafia os limites da tradução tradicional e se apresenta como um campo de disputa política, epistemológica e cultural. O caráter híbrido de sua escrita — atravessada por poesia, ensaio, narrativa autobiográfica e reflexão crítica — demandou não apenas soluções lexicais, mas sobretudo uma postura crítica frente ao texto. Nesse sentido, a tradução foi guiada por uma perspectiva afinada à tradição da tradução feminista, que, como aponta Simon (1996, p. 12-13), nasce da tomada de consciência de que tradução é sempre uma prática situada, marcada por relações de poder e pela identidade de quem traduz. Ao invés de buscar uma neutralidade ilusória, a tradutora feminista assume seu lugar de enunciação e faz da tradução um gesto de ativismo cultural. Von Flotow (1997, p. 14-15; p. 74-75), em consonância, sistematiza três estratégias recorrentes na tradução feminista. A primeira, suplementação, consiste em acrescentar ou expandir sentidos que o texto original sugere, mas que poderiam se perder na passagem para outra língua. A segunda, prefaciá-lo ou anotar em rodapé, envolve explicitar escolhas tradutórias ou contextualizar o texto por meio de prefácios, notas e comentários. Por fim, a terceira, apropriação ou sequestro tradutório, ocorre quando a tradutora intervém de forma mais radical no texto, reinscrevendo-o em um horizonte feminista, mesmo que isso desloque a intenção original. No caso de *Borderlands*, tais procedimentos mostraram-se especialmente relevantes, pois a hibridez textual de Anzaldúa exigiu escolhas que ora suplementam sentidos, ora os contextualizam, ora mesmo se apropriam do texto para reinscrevê-lo em um horizonte político feminista. Assim, a tradução aqui apresentada não apenas acompanha os caminhos teóricos já abertos por Simon e von Flotow, mas também os reinscreve em diálogo com a própria proposta de Anzaldúa, que faz da linguagem um espaço de resistência. Como apontam Arrojo (1998) e Venuti (1995), todo ato tradutório é inevitavelmente marcado por escolhas que refletem valores ideológicos e culturais. Arrojo (1998, p. 26) lembra que traduzir envolve sempre interpretar, e que toda interpretação está atravessada por contextos sociais e posições de sujeito. De modo semelhante, Venuti (1995, p. 17) denuncia a “invisibilidade do tradutor” como efeito de uma ideologia que naturaliza certas escolhas linguísticas e culturais, apagando o caráter político da tradução. Longe de ser neutra, a prática tradutória se configura, portanto, como espaço de inscrição política. No caso desta pesquisa, essa inscrição se deu pela incorporação de estratégias feministas e decoloniais, que buscaram não apenas verter o conteúdo, mas também preservar o gesto insurgente da escrita de Anzaldúa. Os resultados obtidos, portanto, não devem ser entendidos apenas como produto final (a tradução do capítulo 4, apresentada em anexo), mas como processo reflexivo. Nesse sentido, Lerner (2019, p. 6) demonstra como o patriarcado constitui-se historicamente como um sistema de poder que molda não só instituições, mas também linguagens e formas de nomear. Já Bourdieu (1998, p. 45) sublinha que a língua nunca é neutra: falar é exercer poder simbólico, reproduzindo ou desafiando hierarquias sociais. Assim, problematizar escolhas tradutórias significa evidenciar os modos pelos quais a língua opera como instrumento patriarcal, cis-heteronormativo e colonial. Discutir a tradução, portanto, é também discutir como o texto traduzido pode tensionar estruturas hegemônicas e abrir espaço para novas epistemologias. Um dos primeiros desafios enfrentados durante a tradução foi lidar com o hibridismo linguístico que caracteriza a escrita de Anzaldúa. O texto-fonte alterna entre inglês, espanhol e náhuatl, criando um espaço de enunciação fronteiriço que resiste à homogeneização cultural. Esse tipo de lugar — o entre-lugar — é definido por Hanciau (2005, p. 125–141) como um espaço intervalar, uma zona fronteiriça porosa, onde se cruzam identidades, discursos, culturas e temporalidades. É justamente nesse terreno de tensão, de contaminação criativa, que habitam tanto a dor quanto a potência insurgente de sujeitos mestiços. A opção tradutória adotada foi manter no português os segmentos originais em

espanhol e náhuatl, complementados por notas explicativas quando necessário. Essa decisão responde a dois imperativos: primeiro, respeita a materialidade do texto, preservando sua tessitura polifônica e híbrida; segundo, assume uma postura política contra a domesticação da tradução, que, como alerta Venuti (1995, p. 75), tende a apagar as marcas de alteridade do texto estrangeiro. No trecho traduzido, por exemplo, a expressão em espanhol “una herida abierta” foi mantida, com nota que a traduz como “uma ferida aberta”. Essa opção preserva o efeito de estranhamento buscado por Anzaldúa, pois não se trata apenas de transmitir sentido, mas de afirmar a língua como corpo político. Nesse sentido, Simon (1996, p. 2) observa que, na tradução feminista, a fidelidade não deve estar nem ao autor nem ao leitor, mas sim ao projeto de escrita — o que implica valorizar as marcas da diferença, em vez de apagá-las. Algo semelhante ocorre com o termo náhuatl “nepantla”, mantido no texto acompanhado de nota explicativa como “estado de transição, entre-lugar”. Essa escolha reforça a perspectiva decolonial da obra, recusando a substituição de palavras que condensam um universo cultural específico. Arrojo (1994, p.13) enfatiza que a tradução deve ser compreendida como prática cultural e reflexiva, e não como simples transferência de sentido, de modo que eliminar o náhuatl equivaleria a reproduzir a violência de apagamento colonial denunciada por Anzaldúa. Por fim, a preservação do hibridismo linguístico também se aproxima da noção defendida por Britto (2012, p. 23), para quem a fidelidade não se reduz à equivalência lexical, mas envolve um compromisso com a função estética e cultural do texto. Assim, manter o espanhol e o náhuatl, mesmo em meio à tradução para o português, representa uma forma de fidelidade ao projeto político e literário de Anzaldúa. Portanto, a preservação das línguas de fronteira no texto traduzido não é apenas uma estratégia estilística, mas um gesto de resistência: ao manter as palavras que atravessam a fronteira, a tradução reforça o caráter insurgente da escrita de Anzaldúa, recusando a domesticação e afirmando a multiplicidade identitária que constitui o sujeito mestiço. Esse gesto tradutório pode ser ilustrado de forma mais concreta nas quatro tabelas apresentadas no Anexo A (tabelas 1 a 4). Optamos por preservar a hibridez linguística presente no texto original de Gloria Anzaldúa, mantendo termos em espanhol como *mi secreto terrible* e *la seña* (tabela 1), que funcionam como marcas da fronteira cultural e identitária que a autora propõe. Essa escolha não apenas respeita a mistura de línguas do original, mas também reforça a sensação de deslocamento e alteridade experienciada pela narradora. Além disso, a tradução prioriza o feminino em expressões como *expulsa* da manada, evitando a universalização masculina comum em traduções padronizadas. A escolha de *manada* em vez de *rebanho* permite manter a imagem de exclusão e pertencimento a um grupo sem recorrer à linguagem masculina como padrão, preservando o tom figurativo do original. Essa opção reforça a centralidade da experiência feminina e subverte expectativas normativas de linguagem, alinhando-se à perspectiva crítica e subversiva do texto. O cuidado em manter a primeira pessoa, sem recorrer a construções artificiais, preserva a subjetividade e a intimidade do relato, mantendo a força expressiva e a denúncia do sentimento de exclusão e diferença que atravessa o texto. Na tradução (tabela 2), mantivemos termos em espanhol como *la consentida* e *la rancherita* que se avergonzava de su cuerpo para preservar a hibridez linguística do texto-fonte. Optamos por traduzir *the dark Indian self* como “suas raízes”, de forma a valorizar a identidade profunda da narradora e suas origens, mantendo o feminino e evitando a problemática que a expressão literal “índia escura” poderia gerar em português. Da mesma forma, escolhemos “afastava das outras pessoas” para evitar a universalização masculina e reforçar a centralidade da experiência feminina e coletiva, sem perder a sensação de exclusão e distanciamento que atravessa o relato. Mantivemos “eles veem” intencionalmente para evidenciar que os agentes da violência carregam a marca masculina, reforçando a crítica à normatividade patriarcal (anexo 3). Em contrapartida, o restante do texto foi neutralizado ou feminizado: todas as referências à

experiência subjetiva da protagonista permanecem no feminino, como em “ela está à mercê deles”, “precisa impedir que seus olhos absorvam”. Essas escolhas preservam a centralidade da experiência feminina, ao mesmo tempo que destacam a violência masculina como elemento externo e opressor. Na tradução (tabela 4), buscamos preservar a metáfora central do nopal de Castilla, que compara a narradora a um cacto sem espinhos, desprotegido, mantendo a força e a dimensão simbólica de vulnerabilidade e resistência presentes no original em inglês. O uso de termos em espanhol reforça a hibridez linguística e cultural do texto, preservando a fronteira que caracteriza a escrita de Anzaldúa. Optamos por manter “Mamagrande Ramona” em vez de traduzi-la para “Vovó Ramona” ou “Avó Ramona”, preservando a especificidade cultural e emocional do termo original. Para esclarecer o significado, incluímos uma nota de rodapé explicativa: “Mamagrande” é uma forma carinhosa e respeitosa de se referir à avó em famílias chicanas, denotando uma figura matriarcal forte e reverenciada. Essa escolha evidencia a importância da ancestralidade e da continuidade cultural na construção da identidade chicana. Para passagens como as a people, we, Chicanos, optamos por “como comunidade Chicana”, evitando a universalização masculina implícita em povo e mantendo o foco na experiência coletiva e feminina. Da mesma forma, suspect foi traduzido como “percebemos”, preservando a consciência subjetiva do sofrimento. Além disso, mantivemos o feminino em toda a narrativa pessoal — como em desprotegida, afastar os outros e isolar da exposição — reforçando a centralidade da experiência feminina e a subjetividade da narradora. Essas escolhas permitem que a tradução preserve a força emocional do texto, a crítica à opressão social e cultural, e a complexidade das estratégias de defesa do “eu”, respeitando a sensibilidade do original e a perspectiva feminista que atravessa a obra. O processo de tradução, assim, evidencia a impossibilidade da neutralidade. Cada escolha, do verbo mais visceral à manutenção de palavras em outros idiomas, é um posicionamento político explícito. Inspirando-se em Venuti (1995, p. 17), reconhece-se que a tradutora é influenciada por contextos sociais, culturais e históricos; aqui, tais escolhas foram orientadas pelo feminismo decolonial e pela crítica chicana. Recusar a “invisibilidade” da tradução e optar pelo estranhamento é um ato de resistência contra a domesticação editorial, alinhando-se à reflexão de Arrojo (1998, p. 26) sobre as implicações de qualquer produção de significado traduzido. Os impactos dessa tradução são múltiplos. Politicamente, oferece ao público brasileiro ferramentas conceituais feministas, antirracistas e decoloniais, promovendo epistemologias críticas para pensar e combater opressões estruturais semelhantes às descritas por Anzaldúa (Costa; Alvarez, 2013, p. 21). Academicamente, preenche lacunas nos estudos de gênero, teoria queer, estudos pós-coloniais e tradução, possibilitando acesso direto à obra original, essencial para a participação plena da academia brasileira nesses debates. Social e educacionalmente, a tradução serve como recurso pedagógico, permitindo descentralizar o cânone, discutir interseccionalidade e problematizar a língua como campo de poder, estimulando o pensamento crítico. Para exemplificar essas escolhas, selecionamos quatro trechos do capítulo 4 que evidenciam a manutenção da hibridez linguística, a priorização do feminino, a neutralização de construções masculinas universais e a preservação da força emocional e política do texto. Em suma, a tradução de *The Coatlicue State* não é apenas uma transposição linguística; é um gesto político, estético e pedagógico, que mantém a violência, a potência e a corporeidade femininas, respeita a cosmologia e a língua originárias, e posiciona-se criticamente frente às práticas tradicionais de tradução e à homogeneização editorial.

Conclusão

A tradução do capítulo 4 de *Borderlands/La Frontera: The New Mestiza*, de Gloria Anzaldúa, demonstrou que traduzir vai muito além de transpor significados de uma língua para outra; é sobretudo participar de um processo político, estético e cultural. Ao enfrentar o caráter híbrido do texto-fonte, que articula inglês, espanhol e náhuatl, a tradução preservou a multiplicidade de vozes que constituem a escrita fronteiriça de Anzaldúa. Essa decisão tradutória, além de resguardar a materialidade da obra, produziu um efeito de estranhamento coerente com o projeto político da autora. Ao priorizar o feminino em escolhas lexicais e sintáticas, a tradução rompeu com a lógica do masculino universal do português, reafirmando a centralidade das mulheres e de corpos dissidentes na narrativa. O gesto de visibilizar a tradutora e suas opções foi deliberado, assumindo a parcialidade como estratégia de resistência, conforme defendem Simon (1996) e Flotow (1997). Inspirando-se em Venuti (1995), rejeitou-se a “invisibilidade” da tradução, tornando explícito o lugar enunciativo a partir do qual a obra foi recriada. O impacto do trabalho vai além do âmbito acadêmico. Ao disponibilizar, em português, um capítulo fundamental de *Borderlands/La Frontera*, a tradução oferece às leitoras brasileiras acesso direto a conceitos e experiências que dialogam com a realidade local, atravessada por colonialidade, racismo, sexismo e homofobia. Politicamente, contribui para fortalecer epistemologias feministas e decoloniais no Brasil. Para a academia, o estudo disponibiliza em português uma autora central para os estudos feministas, decoloniais e da tradução, favorecendo aprofundamento crítico em cursos de Letras, Literatura, Estudos Culturais e de Gênero. Além disso, oferece chaves teóricas e práticas para pesquisas futuras, como a ampliação da tradução integral da obra de Anzaldúa, a aplicação pedagógica do texto em contextos escolares e universitários e a reflexão sobre estratégias tradutórias que enfrentam estruturas patriarcais e coloniais do português. Dessa forma, este estudo não apenas traduz, mas propõe novas linhas de investigação e debate para a crítica literária e os Estudos da Tradução no Brasil. Traduzir Anzaldúa é, portanto, um gesto ético e político: mais do que trazer sua obra ao português, trata-se de reinscrevê-la no contexto brasileiro, sem apagar suas marcas de hibridez, ampliando sua potência crítica. A tradução feminista não se apresenta como alternativa marginal, mas como prática necessária para construir pontes entre línguas e culturas em um horizonte de resistência e transformação social.

Referências

- ANZALDÚA, Gloria. *Borderlands/La Frontera: The New Mestiza*. 1. ed. San Francisco: Aunt Lute Books, 1987. ANZALDÚA, Gloria. Falando em línguas: uma carta para as mulheres escritoras do terceiro mundo. *Revista Estudos Feministas*, v. 8, n. 01, p. 229-236, 2000. ARROJO, Rosemary. A desconstrução do logocentrismo e as teorias da tradução. *Cadernos de Tradução*, v. 1, n. 1, p. 141-158, 1994. ARROJO, Rosemary. *Oficina de tradução: a teoria na prática*. São Paulo: Ática, 1998. BOURDIEU, Pierre. *A economia das trocas linguísticas: o que falar quer dizer*. São Paulo: Edusp, 1998. BRITTO, Paulo Henriques. *A tradução literária*. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2012. COSTA, Claudia de Lima; ÁLVILA, Eliana. Gloria Anzaldúa, a consciência mestiça e o “feminismo da diferença”. *Revista Estudos Feministas*, Florianópolis, v. 13, n. 3, p. 691-703, 2005. COSTA, Claudia de Lima; ALVAREZ, Sonia. O que é uma tradução feminista? In: COSTA, Claudia de Lima; SCHMIDT, Simone Pereira (orgs.). *Poéticas e políticas feministas*. Florianópolis: Editora Mulheres, 2013. p. 15-34. FLOTOW, Luise von. *Translation and Gender: Translating in the ‘Era of Feminism’*. Manchester: St. Jerome, 1997. HANCIAU, Nubia. O espaço intervalar: notas sobre o entre-lugar da tradução. In: FIGUEIREDO, Eurídice (org.). *Conceitos de literatura e cultura*. Porto Alegre: L&PM, 2005. p. 125-141.

LERNER, Gerda. A criação do patriarcado. Rio de Janeiro: Vozes, 2019. SIMON, Sherry. Gender in Translation: Cultural Identity and the Politics of Transmission. London: Routledge, 1996. VENUTI, Lawrence. The Translator's Invisibility: A History of Translation. London: Routledge, 1995.

Anexos

Anexo 1

Anexo A, tabela 1

Tabela 2

tabela 3

tabela 4

tabela 4

CÓDIGO: HS0534

AUTOR: BIANCA SANTOS DE ALBUQUERQUE

ORIENTADOR: MARCELA APARECIDA CUCCI SILVESTRE

TÍTULO: Tradução do capítulo 3 de “Borderlands/ La Frontera – the new mestiza”,
de Gloria Anzaldúa

Resumo

Este trabalho apresenta a tradução comentada do terceiro capítulo da obra *Borderlands/La Frontera: The New Mestiza* (1987), de Gloria Anzaldúa, fundamentada em uma perspectiva decolonial e feminista, com especial atenção ao uso de linguagem inclusiva. A pesquisa adota referenciais dos Estudos Descritivos da Tradução (Toury, 1995; Even-Zohar, 1990), da Crítica Literária Feminista (Caldas, 1987; Simon, 1996; Lobo, 1999) e dos conceitos de *entre-lugar* (Bhabha, 1994) e *borderthinking* (Mignolo, 2000), integrados ao processo tradutório. A tradução priorizou a preservação da densidade simbólica, das nuances culturais e da pluralidade linguística presentes no texto fonte, que transita entre inglês, espanhol e náuatle. Foram mantidas expressões originais que carregam forte carga cultural, e adotadas estratégias de visibilização de identidades marginalizadas, evitando o uso do masculino genérico e reforçando a representação do feminino e de comunidades chicanas e indígenas. O trabalho também discute decisões terminológicas e sintáticas que preservam o ritmo fragmentado e híbrido da narrativa, bem como a carga política e poética do texto, articulando-se com práticas tradutórias críticas e conscientes das relações de poder.

Palavras-chave: Tradução feminista, Anzaldúa, linguagem inclusiva, decolonialidade, DTS

TITLE: Translation of chapter 3 of *Borderlands/La Frontera – The New Mestiza*, by Gloria Anzaldúa

Abstract

This work presents a commented translation of the third chapter of *Borderlands/La Frontera: The New Mestiza* (1987), by Gloria Anzaldúa, grounded in a decolonial and feminist perspective, with special focus on the use of inclusive language. The research draws on Descriptive Translation Studies (Toury, 1995; Even-Zohar, 1990), Feminist Literary Criticism (Caldas, 1987; Simon, 1996; Lobo, 1999), and the concepts of *in-between space* (Bhabha, 1994) and *borderthinking* (Mignolo, 2000), integrating them into the translation process. The translation aimed to preserve the symbolic density, cultural nuances, and linguistic plurality of the original text, which alternates between English, Spanish, and Nahuatl. Original expressions with strong cultural meaning were retained, and strategies were adopted to make marginalized identities visible, avoiding the use of the generic masculine

and emphasizing the representation of women and Chicana and Indigenous communities. The work also discusses terminological and syntactic decisions that maintain the fragmented and hybrid rhythm of the narrative, as well as the text's political and poetic force, aligning with critical translation practices aware of power relations.

Keywords: Feminist translation, Anzaldúa, inclusive language, decoloniality, DTS

Introdução

Nos últimos anos, tem-se observado um crescente interesse, no mercado editorial brasileiro, por propostas de tradução e revisão que articulem abordagens inclusivas, com o propósito de se evitar incoerências indevidas e discursos que reforcem estereótipos. Tal movimento reflete uma busca por maior inclusão no mundo literário e, também, uma maior observação às complexidades culturais, identitárias e políticas das obras traduzidas e revisadas. Nesse contexto, este projeto de pesquisa propôs-se a traduzir o terceiro capítulo do livro *Borderlands/La Frontera: The New Mestiza* (1987), de Gloria Anzaldúa, utilizando linguagem inclusiva, a partir de uma perspectiva que integra os Estudos Descritivos da Tradução (DTS) (Toury, 1995; Even-Zohar, 1990), Crítica Literária Feminista (Caldas, 1987) e os conceitos de *entre-lugar* (Bhabha, 1994) e *borderthinking* (Mignolo, 2000).

Gloria Anzaldúa (1942–2004) foi uma teórica chicana, poeta, feminista e ativista queer, referência nos estudos de teoria cultural e lutas decoloniais, cujas obras se destacam por combinar relatos autobiográficos, teoria cultural e lutas decoloniais. Nascida no sul do Texas, em uma região por ela denominada de “herida abierta” (Anzaldúa, 1987, p. 21), devido ao histórico marcado por tensões de fronteira física e cultural, sua experiência de vida foi decisiva para a construção de sua visão de mundo e, consequentemente, de sua escrita.

O livro *Borderlands/La Frontera: The New Mestiza*, até hoje sem tradução completa para o português, constrói-se a partir de uma tecelagem de narrativas pessoais, análises sociopolíticas e poesias, habilmente entrelaçadas e alternadas entre os idiomas inglês, espanhol e náuatle, de modo a refletir a vivência da escritora na fronteira linguística e cultural. No mundo acadêmico, a obra tornou-se um texto fundamental para a compreensão de conceitos ligados à resistência contra estruturas coloniais e patriarcais, influenciando profundamente áreas como os estudos culturais, os estudos chicanos e a teoria queer.

O terceiro capítulo do livro, “Entering into the Serpent”, explora dimensões espirituais e culturais da identidade chicana, resgatando figuras como a deusa asteca Coatlicue e analisando sua representação atual na cultura mexicana, marcada por processos patriarcais de transformação social e cultural. Traduzir esse capítulo para o português, como parte de um projeto mais amplo de tradução integral da obra, contribui para debates que articulam temas como colonialismo e emancipação identitária, além de dialogar com a experiência de múltiplas “fronteiras” culturais e sociais presentes em diferentes regiões, inclusive no Brasil. Anzaldúa “queria que *Borderlands* não apenas difundisse, mas também produzisse conhecimento” (Anzaldúa, 2021, p. 154) e, assim, o processo de tradução desse texto busca contribuir para essa mesma prerrogativa.

A adoção de uma linguagem inclusiva na tradução reafirma o compromisso com práticas decoloniais e com a valorização de subjetividades não normativas no espaço acadêmico e tradutório, lutas presentes no texto da Anzaldúa de forma significativa. O processo de tradução do terceiro capítulo teve em mente as disputas simbólicas e políticas presentes em

línguas com marcações de gênero, como é o caso da língua portuguesa, tendo a preocupação de manter a densidade simbólica e teórica presentes no texto-fonte, acerca da espiritualidade decolonial, da experiência da mestiçagem e do corpo como território fronteiriço.

Diante disso, essa tradução adota uma linguagem inclusiva não-sexista, usando como base o texto-manual de Franco (2006), dentro da norma culta, sem se prender às estruturas tradicionais que reforçam uma lógica patriarcal como marca regular. Nesse sentido, nosso objetivo é apresentar uma forma de tradução que não fere minorias, mantendo o foco na subjetividade de uma mulher chicana, *Queer*, poeta e teórica que produz conhecimento a partir de seu sistema-mundo único.

Metodologia

A metodologia adotada neste projeto de pesquisa e tradução é de natureza qualitativa, com enfoque em uma ação crítico-interpretativa. O estudo parte da proposta de traduzir uma obra teórica complexa, priorizando não a fidelidade semântica, mas a preservação de sua densidade simbólica, suas nuances culturais e seu discurso político. A escolha metodológica se alinha a perspectivas que entendem a tradução como uma prática situada, ética e atravessada por disputas de poder e representação.

Nesse sentido, esse trabalho foi ancorado nos Estudos Descritivos da Tradução (Descriptive Translation Studies – DTS), desenvolvido por teóricos como Gideon Toury (1995) e Itamar Even-Zohar (1990), que propõem uma análise que considera os contextos históricos, culturais e ideológicos para moldar as decisões tradutórias pois, “os tradutores atuam, em primeiro lugar, no interesse da cultura para a qual estão traduzindo” (Toury, 1995, p. 6, tradução nossa) [1]. Essa perspectiva se mostra especialmente útil no caso da obra em questão, cuja escrita transita entre línguas (inglês, espanhol, náuatle), registros (poético, ensaístico, narrativo) e campos disciplinares que rompem com os limites tradicionais de um texto acadêmico, tornando-o um texto multifacetado que precisa de um cuidado maior em seu processo de tradução para outra cultura.

Os conceitos de entre-lugar (Santiago, 1994) e bordethinking (Mignolo, 2000) foram levados em consideração para embasar a proposta, tendo em mente seus estudos na construção do espaço na identidade social. Esses conceitos trabalham espaços híbridos onde os significados são continuamente negociados e reconfigurados; esses "entre-lugares" “fornecem o terreno para a elaboração de estratégias de subjetivação - singular ou coletiva - que dão início a novos signos de identidade” (Bhabha, 1994, p. 20) e confrontam lógicas eurocêntricas ainda predominantes nas práticas acadêmicas e tradutórias. Esse espaço de incerteza e ambiguidade é apresentado na experiência chicana que Anzaldúa retrata, através de deslocamentos culturais e linguísticos.

Paralelamente, o projeto foi fortemente influenciado pelos fundamentos da Crítica Literária Feminista aplicada à tradução, no processo de tentar desafiar as normas linguísticas patriarcais presentes em línguas com marcação de gênero, como a língua portuguesa. Ao incorporar a Crítica Literária Feminista à prática tradutória, o projeto compreende a tradução como um espaço de agência e negociação, especialmente em relação a vozes marginalizadas. Para isso, consideramos autores como Simon (1996) e Lobo (1999) como fonte de arguição da Crítica Literária Feminista e outros como Sara Mills (2008) e Paki Venegas Franco (2006), que demonstram como o uso não sexista da linguagem pode intervir de forma política

nas estruturas discursivas dominantes, revelando os processos de apagamento, silenciamento ou ressignificação que afetam textos produzidos por mulheres e sujeitos subalternizados.

Vista como uma ferramenta “em um campo de batalha” que, muitas vezes, define o “direito de estar em determinados ambientes, falar de determinada maneira e exercer determinados empregos” (Mills, 2008, p. 2, tradução nossa) [2], a linguagem inclusiva foi adotada de maneira consciente, sem finalidade estética ou formal, mas derivada de uma reflexão ética e política sobre o papel da linguagem na manutenção de estruturas de dominação. Essa estratégia tradutória exigiu atenção redobrada na escolha de pronomes, formas verbais, substantivos e estruturas gramaticais, bem como uma constante negociação entre inteligibilidade e subversão.

No processo de tradução decidimos fazer uso das notas de rodapé, principalmente para os termos apresentados em náuatle, por acreditarmos na manutenção da ideia do texto plural criado por Anzaldúa, mesclando o português aos outros três idiomas presentes no texto-fonte. As notas de rodapé tiveram como função explicar termos que não possuíam tradução direta para o português, mas que possuíam uma grande carga cultural em seus significados.

Em síntese, o método desenvolvido ao longo desta pesquisa é resultado da convergência entre diferentes tradições críticas, adaptado às especificidades do objeto em estudo. Ele se ancora em uma epistemologia do cuidado e da resistência, que entende o tradutor como agente engajado, consciente das implicações políticas de suas escolhas. Ao mesclar teoria, análise, ética e estética, a metodologia aqui empregada oferece uma contribuição significativa para os estudos contemporâneos de tradução e para o mercado editorial brasileiro.

Resultados e Discussões

1. Considerações iniciais acerca do texto traduzido.

O capítulo traduzido dialoga profundamente com mitologias mesoamericanas, práticas espirituais indígenas e experiências corporais da autora, construindo, de forma poética e quase jornalística, um relato da cultura chicana e seu entrelaçamento espiritual a ela. Sua escrita busca curar feridas coloniais elucidando os apagamentos históricos do feminino em sua cultura. O texto exige do leitor uma escuta atenta dos ritmos, silêncios e imagens que nele se criam e sua tradução é, de certo modo, adentrar o próprio ethos de Anzaldúa, sua identidade.

Anzaldúa faz essa busca especialmente no papel das deusas Serpente (Coatlícue, Coatlalopeuh, Cihuacoatl) e a forma como foram desfiguradas ou “domesticadas” pela colonização espanhola e pela Igreja Católica. O terceiro capítulo mostra como, antes da militarização e centralização do Império Asteca, existia um princípio de dualidade equilibrada entre masculino e feminino (Anzaldúa, 1987, p. 27). A harmonia foi rompida pela imposição de uma ordem patriarcal e guerreira, que deslocou as divindades femininas para o submundo simbólico e político. Ao contar essa história, Anzaldúa resgata narrativas apagadas e questiona versões oficiais.

Culturalmente, o texto funciona como um inventário vivo de símbolos que estruturam a identidade chicana: a serpente como força criadora e destruidora, a Virgem de Guadalupe como síntese (e também como distorção) do sagrado indígena, e figuras arquetípicas como La Llorona e La Chingada (Anzaldúa, 1987, p. 30). A autora mostra como esses símbolos

operam de forma ambígua, tanto para controlar e oprimir, como para resistir e unir. A presença da serpente se liga à experiência corporal, sexual e espiritual, criando um elo com tradições orais, rituais e cosmologias que sobrevivem à margem da religião institucional.

O capítulo desmonta o aparato simbólico do colonialismo, revelando como a conquista espiritual foi tão violenta quanto a física. A “dessexualização” da Virgem e a demonização das deusas indígenas exemplificam a estratégia de cortar as raízes espirituais e culturais do povo colonizado. Anzaldúa propõe uma reconciliação com essas figuras, reintegrando o “lado sombrio”, rejeitado, e implicando, também, a reintegração de partes marginalizadas de si mesma. A noção de la facultad, da sensibilidade aguçada desenvolvida pelos corpos e mentes marginalizados é, aqui, uma epistemologia fronteira que desafia a hierarquia ocidental de racionalidade.

O capítulo apresenta uma estrutura narrativa híbrida e não linear, que reflete a própria experiência de viver nas fronteiras culturais e identitárias. Essa estrutura é uma apresentação do conceito de borderthinking, que “trabalha para a restituição da diferença colonial que a tradução colonial (unidirecional, como a globalização atual) tentou apagar” (Mignolo, 2000, p. 3, tradução nossa) [3].

A figura da serpente, introduzida no título do capítulo, funciona como símbolo principal do texto e representa a ligação com as deusas mesoamericanas. Ao “entrar” na serpente, a narradora descreve um mergulho em territórios internos e coletivos de memória, assumindo a fusão entre corpo e mito. O texto alterna memórias pessoais, fragmentos de infância marcados por imagens vívidas de cobras e medos transmitidos pela tradição oral, com trechos de reconstrução histórica sobre o México pré-colonial e o processo de colonização espiritual. Poemas, canções e epígrafes dialogam com a prosa, criando uma textura literária que mistura voz íntima, comentário acadêmico e narrativa mítica.

Quanto à tradução para o português, o desafio central foi preservar tanto a densidade poética como o pensamento revolucionário da autora, levando em consideração a cultura de recepção, que é a brasileira. Simon (1996, p. 2) defende que uma tradução sensível às questões de gênero não se limita a preservar a fidelidade apenas ao autor ou ao leitor, mas prioriza o próprio projeto de escrita. A tradução se propôs a respeitar o plurilinguismo original, optando por manter, em determinados excertos, algumas palavras ou expressões em espanhol e em inglês, já que elas carregam camadas culturais e afetivas que se perderiam na adaptação. Além disso, mantivemos o ritmo fragmentado e a alternância de gêneros sem “uniformizar” a narrativa, evitando que o texto soasse excessivamente linear, já que essa irregularidade é parte essencial de sua força estética e política. A tradução, portanto, não foi apenas um ato linguístico, mas um gesto cultural de mediação entre mundos, assim como o próprio texto o é.

2. O universo de Anzaldúa em um texto plural.

A repetição de um mesmo termo em outra língua, além de constituir uma marca da herida aberta, onde “o espaço da ferida é a fronteira, a língua fraturada configura nossa resistência” (Palacio, 2020, p. 40, tradução nossa)[4], também atua como recurso pedagógico, sem romper a fluidez da leitura nem sua função de luta. Por isso, optamos por manter a estrutura do texto-fonte, ampliando a familiaridade do leitor com a língua estrangeira. Afinal, “situada no espaço e no tempo, a linguagem estrutura um universo de significados que deixa de fora a realidade daqueles que não falam com você” (Palacio, 2020, p. 36, tradução nossa)[5]. Desejamos, assim, que esta tradução funcione como uma porta de entrada para novos leitores ao universo de Anzaldúa.

Para ilustrar como essas escolhas se materializaram no texto traduzido, apresentamos a seguir algumas decisões exemplificadas.

Conforme a Tabela 1 (Anexo B), observa-se que a opção por manter "No vayas al escusado en lo oscuro" sem tradução preserva a linguagem plural e a atmosfera oral familiar, funcionando como elemento de imersão cultural. Também a manutenção de "Prieta" sem tradução reforça seu valor afetivo e identitário, evitando neutralizações.

A tradução adota um ritmo pausado e preserva a mesma diagramação do texto de Anzaldúa, utilizando a repetição de palavras não traduzidas como estratégia para acostumar o leitor à complexa alternância de idiomas. Além disso, optou-se por manter, em *itálico*, palavras que são semelhantes em espanhol e português, mas cuja leitura deve ser feita com uma fonética distinta, indicando ao leitor a necessidade de uma pronúncia diferenciada.

Seguindo a mesma lógica na Tabela 2 (Anexo B), a escolha por manter "el azadón" e "el quelite" preserva o vocabulário específico da vida rural chicana e reafirma o lugar de fala da narradora ao relatar uma memória pessoal. A estrutura sintática mantém a cadência do original, preservando a tensão dramática da cena e habituando o leitor à presença dos objetos que a protagonizam: "el quelite", pela repetição, e "el azadón", pela imagem mental evocada pelo movimento.

3. Linguagem inclusiva na prática.

A estrutura gramatical de uma língua não incorpora, obrigatoriamente, o uso de pronomes e substantivos. Geralmente, eles são "introduzidos em uma língua e, posteriormente, regulamentados por gramáticos, (...) podendo ser alterados, mesmo que pareçam profundamente enraizados na estrutura da língua." (Mills, 2008, p. 51, tradução nossa)[6]. Tendo isso em mente, trouxemos propostas de mudanças com base no texto de Franco (2006).

Conforme a Tabela 3 (Anexo B), a opção pelo uso do pronome "eles", no masculino, na tradução do trecho "They divided her who had been complete", mesmo quando haveria possibilidade de formas neutras ou inclusivas, é uma estratégia para marcar explicitamente os agentes de violência no gênero masculino. Essa decisão linguística explicita a responsabilização dos homens e impede a diluição dos sujeitos ativos da agressão, enfatizando a ação e o gênero dos agressores.

Por outro lado, a tradução de *darkened* para "maculadas" foi usada para suavizar a conotação de "escurecidas", evitando associações racistas ainda presentes no imaginário brasileiro, em que "escuro" tem o histórico de ser vinculado a algo negativo. Assim, preserva-se o sentido de degradação e despotencialização sem reforçar construções discriminatórias.

Optou-se por "Self-feminino" em vez de "eu feminino" para preservar a carga conceitual específica do termo *Self* na psicanálise, que ultrapassa a noção comum de "eu" e remete a uma construção identitária mais ampla e complexa.

Nesse trecho, também houve preservação dos nomes próprios e das divindades na forma original, valorizando seu peso cultural e simbólico. O termo *aspects* foi traduzido como "representações", garantindo a uniformidade feminina dos conceitos e figuras mitológicas.

Por fim, um dos primeiros pontos acordados no processo de tradução foi a recuperação da visibilidade das mulheres por meio do uso de "genéricos" (Franco, 2006, p. 32), que seriam

termos usados para um tratamento geral de um grupo específico. Essa estratégia atravessa todo o trabalho e se articula às demais escolhas tradutórias.

Podemos ver outro caso, conforme a Tabela 4 (Anexo B), em que a tradução opta por “a população mexicana” para “the Mexican”, de forma inclusiva e não essencialista, evitando o uso do masculino genérico e reforçando a noção de coletividade.

A decisão de utilizar o feminino para traduzir o termo “terra” partiu da observação de que Gloria Anzaldúa retrata a história de sua terra por meio de representações femininas, contrapondo-as à colonização pelos Estados Unidos, aqui simbolizados como uma figura masculina que “violou” a terra mexicana (Anzaldúa, 1987, p. 5). Com isso, a opção por uma tradução feminista se mostrou extremamente apropriada, já que “incorpora idéias sobre o corpo, a linguagem e a psique da mulher, que são interpretadas em relação aos contextos sociais em que ocorrem” (Lobo, 1999, p. 45-46).

No texto-fonte, a frase em espanhol “Desde entonces para el mexicano ser Guadalupano es algo esencial” foi preservada para manter sua carga cultural e afetiva, permitindo que a tradução dialogue com a sonoridade do texto original. Optou-se, portanto, por conservar o espanhol e traduzir apenas a repetição escrita em inglês.

Decidiu-se também manter em inglês o acrônimo dos Estados Unidos, com uma leve modificação, em alguns momentos, de “US” para “USA”. Desse mesmo modo, preservaram-se os nomes de localidades em seu idioma original, como forma de respeitar a cultura embutida nesses termos e manter a ideia de pluralidade linguística no texto.

No último fragmento desta seção, conforme a Tabela 5 (Anexo B), a tradução mantém a historicidade e a especificidade do evento (a greve das uvas) e substitui “farmworkers” por “classe trabalhadora agrícola chicana”, explicitando a dimensão étnico-cultural, além de empregar o termo “população agricultora”.

Ao optar por essas mudanças, em vez de uma tradução literal de farmworkers, a tradução devolve visibilidade a um grupo que, historicamente, não foi reconhecido com plenitude nas narrativas oficiais. Franco (2006, p.13) diz que “o que não se nomeia não existe e utilizar o masculino como genérico tornou invisível a presença das mulheres na história, na vida cotidiana, no mundo”. O termo “população”, por sua vez, expande a imagem mental para além da figura do trabalhador masculino, abrangendo mulheres, crianças e famílias inteiras na luta.

4. Termos específicos e suas cargas simbólicas.

Nesta seção, reunimos os fragmentos em que, para a tradução, consideramos a presença de termos com forte carga histórica e cultural. Conforme acordado inicialmente, ao preservar a pluralidade do texto de Anzaldúa, optamos também por manter expressões que transmitissem um significado mais profundo da cultura indígena, contribuindo para a preservação da ambientação do texto-fonte.

Para exemplificar esse procedimento, destacamos, na Tabela 6 (Anexo B), a decisão de não traduzir *mi tono*. Essa escolha preserva o conceito espiritual mesoamericano de animal guardião ou duplo espiritual (Anzaldúa, 1987, p. 93), que não possui equivalente direto no português. Uma tradução direta da palavra “tono” corresponderia somente a “tom”, em português, que não carrega o sentido de ligação com o animal espiritual, invalidando a

integridade cultural e simbólica do termo. Para isso, mantivemos a escolha de uma nota de rodapé, também presente no texto-fonte, para uma explicação mais aprofundada do termo.

Na Tabela 7 (Anexo B), podemos verificar três intervenções. A primeira foi a manutenção da expressão “La Víbora” acompanhada de sua contraparte em português, preservando no texto-alvo uma proximidade com o original.

A segunda consistiu em tratar um substantivo que se referia a um povo de modo a enfatizar a ideia de civilização. Um termo que, até então, era frequentemente empregado para identificar populações no masculino, ao usar o (“os”), aqui foi reinterpretado como a identidade de um povo, permitindo a utilização de um adjetivo temporal no feminino antes de “Olmec” evitando, assim, tratar uma civilização inteira no masculino.

A terceira, por fim, foi a decisão de manter em inglês a expressão “a coiled Serpent”, marcando sua importância simbólica. A serpente, por ocupar um lugar central no sistema de crenças do povo asteca, é um dos animais mais representados em sua arte. Na escultura tridimensional em pedra, costuma ser retratada enrolada ou com nós, numa alusão ao planeta Terra, tanto pelas palavras de Anzaldúa (1987, p. 26), como pela forma física. Ver Figura 1 (Anexo C).

Em um último fragmento selecionado para análise, conforme a Tabela 8 (Anexo B), o termo *papoose* é mantido a fim de reforçar sua carga cultural indígena, juntamente com uma nota de rodapé trazendo o seu contexto. Na cultura indígena, o *papoose* não é apenas um lugar onde o bebê é colocado para descansar e dormir. Ele funciona como um suporte no qual a criança permanece presa durante grande parte dos primeiros seis meses de vida. É, na verdade, mais um carregador de bebê do que um berço tradicional, embora sirva para ambas as funções.

Conclusão

A tradução do capítulo *Entering into the Serpent* confirmou que práticas tradutórias feministas e decoloniais, como defendidas por Simon (1996) e Franco (2006), funcionam não apenas como escolhas estéticas, mas como intervenções políticas capazes de restituir visibilidade a vozes historicamente apagadas.

A recusa ao masculino genérico garante a representação da presença do feminino na narrativa. Essa opção se soma à manutenção da pluralidade linguística: inglês, espanhol e náuatle, como estratégia de resistência e de aproximação do leitor brasileiro à estética fragmentada e híbrida de Anzaldúa, coerente com a noção de entre-lugar proposta por Bhabha (1994) e *borderthinking* por Mignolo (2000).

A tradução reafirma que o trabalho tradutório é um processo politizado, no qual decisões lexicais e sintáticas moldam não só o sentido, mas também o alcance político do texto. Preservar o ritmo não linear e o caráter poético, evitando “uniformizar” a narrativa, foi essencial para manter o projeto literário de Anzaldúa.

Assim, este trabalho reforça que traduzir obras de caráter decolonial e plurilíngue exige uma metodologia que una rigor teórico e compromisso ético, entendendo a tradução como mediação cultural e como ação transformadora. Para pesquisas futuras, propõe-se a ampliação de estudos comparativos sobre estratégias inclusivas em traduções de textos

híbridos, visando aprofundar a compreensão do impacto dessas escolhas na recepção e circulação de vozes subalternizadas no espaço acadêmico e editorial.

Referências

ANZALDÚA, G. **Borderlands/La frontera: The New Mestiza**. San Francisco: Aunt Lute Books, 1987.

ANZALDÚA, G. **A vulva é uma ferida aberta e outros ensaios**. Tradução: Tatiana Nascimento. Rio de Janeiro: A Bolha Editora, 2021.

BHABHA, H. K. **O Local da cultura**. Tradução: Myriam Ávila. Belo Horizonte: UFMG, 2003.

FRANCO, P. **Manual para o uso não sexista da linguagem** : o que bem se diz - bem se entende. Tradução: Beatriz Cannabrava. Brasil: REPEN, 2006.

ITAMAR EVEN-ZOHAR. **Polysystem studies**. Durham, Nc: Duke University Press, 1990.

LEFEVERE, A. **Tradução, reescrita e manipulação da fama literária**. Trad. Claudia Matos Seligmann. Bauru: Edusc, 2007.

LOBO, L. **A dimensão histórica do feminismo atual**. In: RAMALHO, C. (org.). Literatura e feminismo: propostas teóricas e reflexões críticas. Rio de Janeiro: ELO, 1999, p. 41-50.

Metmuseum. "Coiled Serpent". Disponível em: <<https://www.metmuseum.org/art/collection/search/307635>>. Acesso em 13/08/25.

MIGNOLO, W. **Local histories/global designs: Coloniality, subaltern knowledges, and border thinking**. Princeton, N.J.; Oxford: Princeton University Press, 2000.

MILLS, S. **Language and sexism**. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

PALACIO, M. **Gloria Anzaldúa : poscolonialidad y feminismo**. Barcelona: Gedisa, 2020.

SANTIAGO, Silviano. **Uma literatura nos trópicos: ensaios sobre dependência cultural**. São Paulo: Perspectiva: Secretaria da Cultura, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo, 1978.

SIMON, S. **Gender in Translation: cultural identity and politics of transmission**. London: Taylor & Francis e-Library, 1996.

TOURY, G. **Descriptive translation studies - and beyond**. Amsterdam; Philadelphia: John Benjamins Pub. Co, 2012.

Anexos

Anexo B: Tabela 1

Anexo B: Tabela 2

Anexo B: Tabela 3

Anexo B: Tabela 4

Anexo B: Tabela 5

Anexo B: Tabela 6

Anexo B: Tabela 7

Anexo B: Tabela 8

Anexo C: Figura

CÓDIGO: HS0606

AUTOR: BRENDON LUCIANO GOMES

ORIENTADOR: ADA LIMA FERREIRA DE SOUSA

TÍTULO: Letramentos acadêmicos, linguagem e metacognição: planos de trabalho com leitura e escrita no Bacharelado em Ciências e Tecnologia e Engenharias.

Resumo

Este relatório de pesquisa tem como objetivo a análise da pertinência da sondagem diagnóstica a ser aplicada em turmas do componente curricular Práticas de Leitura e Escrita I do Bacharelado em Ciências e Tecnologia (BC&T) e das Engenharias que compõem o seu segundo ciclo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, tendo como base o conceito de letramento Acadêmico (Botelho; Neves, 2019; Koerner, 2024; Kleiman et al, 2024) e de pressupostos teóricos dos estudos em Metacognição (Botelho, 2015; Vargas, 2012; 2017; Almeida, 2017). Trata-se de uma pesquisa de natureza básica, qualitativa e descritiva, que consistiu na análise de doze itens do questionário diagnóstico em questão, relacionando-os ao referencial teórico adotado. A investigação revelou que a sondagem se mostra pertinente enquanto instrumento metacognitivo e pedagógico, pois favorece a autorreflexão dos estudantes sobre suas vivências, rotinas de estudo, experiências prévias e condições externas que afetam os seus desempenhos acadêmicos. Verificou-se também que o questionário possibilita ao docente conhecer de forma mais ampla o seu alunado e ao discente tomar consciência de suas potencialidades, limitações e estratégias de aprendizagem. Logo, a pesquisa pode contribuir para os estudos de ferramentas diagnósticas que visem práticas de leitura e escrita mais críticas, reflexivas e alinhadas às especificidades dos estudantes.

Palavras-chave: Letramento acadêmico; Metacognição; Sondagem diagnóstica

TITLE: Academic Literacies, Language, and Metacognition: Work Plans with Reading and Writing in the Bachelor of Science and Technology and Engineering Programs

Abstract

This research report analyzes the relevance of a diagnostic survey designed for classes in the curricular component Reading and Writing Practices I of the Bachelor of Science and Technology (BC&T) and Engineering programs in their second cycle at the Federal University of Rio Grande do Norte. Grounded in the concept of Academic Literacy (Botelho & Neves, 2019; Koerner, 2024; Kleiman et al., 2024) and theoretical approaches to Metacognition (Botelho, 2015; Vargas, 2012, 2017; Almeida, 2017), this qualitative and descriptive study examines twelve items of the proposed diagnostic questionnaire, relating them to the theoretical framework adopted. The findings indicate that the survey is relevant as both a metacognitive and pedagogical tool, fostering students' self-reflection on their experiences, study routines, prior knowledge, and external conditions that influence academic performance. Moreover, it enables teachers to gain a broader understanding of their students while allowing learners to recognize their potential, limitations, and learning strategies. The

study contributes to research on diagnostic tools aimed at fostering more critical, reflective reading and writing practices tailored to students' specific needs.

Keywords: Academic literacy; Metacognition; Diagnostic survey

Introdução

Este relatório de pesquisa, referente ao plano de trabalho “Letramentos acadêmicos, linguagem e metacognição: planos de trabalho com leitura e escrita no Bacharelado em Ciências e Tecnologia e Engenharias”, tem como objetivo geral analisar a pertinência da sondagem diagnóstica a ser aplicada em turmas do componente curricular Práticas de Leitura Escrita I do Bacharelado em Ciências e Tecnologia (BC&T) e de Engenharias que compõem seu segundo ciclo na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tal análise foi baseada nos seguintes objetivos específicos: análise e discussão de conceitos pertinentes, especificamente o de letramento acadêmico (Botelho; Neves, 2019; Koerner, 2024; Kleiman et al, 2024) e de pressupostos teóricos dos estudos em Metacognição (Botelho, 2015; Vargas, 2012; 2017; Almeida, 2017); análise e discussão das questões constitutivas do formulário, com o fito de estabelecer relações com os conceitos anteriormente estudados; elaboração de produtos de pesquisa como vídeos de divulgação científica, artigos para apresentação em congressos e publicação em periódicos, entre outros. Este trabalho compõe o projeto “Letramentos acadêmicos, linguagem e metacognição: planos de trabalho com leitura e escrita na universidade”, cujo principal objetivo é investigar o letramento linguístico acadêmico e as questões de ensino propostas no projeto, a fim de propor estratégias que promovam o desenvolvimento das habilidades de letramento dos discentes no espaço acadêmico. Em virtude do seu caráter integrador, esta pesquisa dialoga com o plano de trabalho “Letramentos acadêmicos, linguagem e metacognição: planos de trabalho com leitura e escrita nos cursos de Letras, de Ciências Humanas e de Ciências da Saúde”, o qual apresenta correspondências com nossos objetivos gerais, mas centrando-se em outro contexto acadêmico como locus de pesquisa. Nesse sentido, a sondagem diagnóstica cujos itens constituem o nosso corpus tem como propostas a identificação das principais dificuldades relacionadas às habilidades de leitura e escrita do público-alvo mencionado e a caracterização dos perfis das turmas no que se refere às dificuldades de leitura e escrita que incidem sobre os letramentos acadêmicos, para que, após a análise dos dados, possam ser apontados caminhos e estratégias para melhoria no desenvolvimento das habilidades de letramento linguístico dos discentes. Esse questionário foi aprovado pelo Comitê de Ética e Pesquisa (CEP) em data posterior ao previsto inicialmente no calendário deste plano de trabalho, motivo pelo qual os resultados da sua aplicação serão analisados em planos de trabalho futuros. Assim, nos deteremos a analisar, sob a perspectiva da Linguística Aplicada e da Metacognição, a pertinência dos itens que compõem a sondagem diagnóstica em questão. Ainda nessa perspectiva, é válido observar que a escolha das turmas para a aplicação da pesquisa decorreu da regência da professora orientadora, Ada Lima Ferreira de Sousa, no componente curricular das graduações anteriormente mencionadas, o que possibilitará alcançar estudantes provenientes de diferentes áreas do conhecimento. A análise do questionário diagnóstico possibilitou avaliar a pertinência das questões no sentido de, ao ser aplicado futuramente, promover a autorreflexão dos estudantes sobre suas vivências, rotinas de estudo, experiências prévias com leitura/escrita e condições externas que afetam o desempenho acadêmico. Assim, além desta introdução, o relatório será estruturado nas seguintes seções: metodologia, que descreve a natureza da pesquisa e os procedimentos adotados; resultados e discussões, com a apresentação do referencial teórico e da análise propriamente dita das questões da sondagem

diagnóstica; conclusões, nas quais se destacam a relevância e as contribuições do plano de trabalho; e, por fim, as referências bibliográficas.

Metodologia

A pesquisa realizada é de natureza básica (Gil, 2002), de abordagem qualitativa e de cunho descritivo, uma vez que tivemos como objetivo geral analisar, no âmbito dos estudos em Metacognição e da Linguística aplicada, a pertinência da sondagem diagnóstica a ser aplicada em turmas do componente curricular Práticas de Leitura Escrita I do Bacharelado em Ciências e Tecnologia (BC&T) e de Engenharias que compõem seu segundo ciclo na UFRN. O questionário objeto desta análise foi elaborado anteriormente ao projeto, aperfeiçoado nesse âmbito e aprovado pelo Comitê de Ética e Pesquisa (CEP) sob o número do parecer 7.512.256 junto CAAE (Certificado de Apresentação de Apreciação Ética) 85711724.0.0000.5537. Objetiva-se, em pesquisas básicas e qualitativas, a geração de conhecimentos novos e universais, por meio do aprofundamento e da compreensão de aspectos não quantificáveis da realidade. Além disso, pesquisas de cunho descritivo-explicativo objetivam analisar os fenômenos estudados por meio da interpretação possibilitada pelos métodos qualitativos. Desse modo, recorrer à linguagem matemática, coletar dados e submetê-los à prova de fatos, assim como utilizar ferramentas padronizadas e neutras, não seria coerente com os objetivos de análise deste estudo (Fonseca, 2002). A sondagem diagnóstica objeto desta pesquisa é constituída de doze itens, os quais versam sobre aspectos de ensino-aprendizagem concernentes a práticas de leitura e escrita em ambiente acadêmico. No que diz respeito aos procedimentos metodológicos, inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico (Gil, 2002), em livros e artigos científicos, de conceitos pertinentes, ao longo do qual voltamos a nossa atenção ao conceito de letramento acadêmico (Botelho; Neves, 2019; Koerner, 2024; Kleiman et al, 2024), bem como nos ancoramos em pressupostos teóricos dos estudos em Metacognição (Botelho, 2015; Vargas, 2012; 2017; Almeida, 2017); em seguida, lemos, discutimos e aprimoramos as questões do formulário, buscando estabelecer relações com os conceitos estudados; por fim nos dedicamos à elaboração dos produtos de pesquisa (trabalho do CICT, resumos para submissão a eventos, apresentações orais, artigos científicos).

Resultados e Discussões

Conforme o referencial teórico-metodológico que fundamenta a nossa pesquisa, a metacognição é uma habilidade dos seres humanos de monitorar e regular seus próprios processos cognitivos, podendo se tratar, então, de uma estratégia reguladora da aprendizagem. Desse modo, tem-se que essa habilidade se relaciona diretamente à capacidade de o sujeito administrar seus próprios modos de pensar e as estratégias necessárias empregadas para solucionar problemas, buscando identificar meios de aprimorar esse fazer (Botelho; Neves, 2019). Nesse sentido, ao considerarmos a consciência dos aspectos concernentes à realização das tarefas enquanto são realizadas, entendemos que as práticas relacionadas ao “pensar sobre o pensar” podem e devem ser ensinadas, o que constitui premissa fundamental para o ensino de leitura e escrita no ambiente acadêmico (Botelho; Neves, 2019). Assim, na abordagem aqui adotada, o letramento acadêmico deve considerar uma formação leitora e a construção de conhecimentos relativos a uma cognição relacional, “segundo a qual a compreensão e a estruturação de abstrações e conceituações são levadas a cabo ao se confrontar e cotejar o próprio conhecimento e os fenômenos do mundo com os

conteúdos lidos/estudados” (Neves, 2017, p. 474). Diante disso, este trabalho teve como objetivo analisar a pertinência da sondagem diagnóstica a ser aplicada em turmas do componente curricular Práticas de Leitura Escrita I do Bacharelado em Ciências e Tecnologia (BC&T) e de Engenharias que compõem seu segundo ciclo na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. A escolha dessa análise se dá pelo fato de os questionários diagnósticos serem ferramentas metacognitivas pertinentes, já que possibilitam aos alunos se conhecerem como aprendizes e aos professores conhecerem melhor suas turmas, otimizando o seu processo de ensino-aprendizagem com base na autorregulação e na reflexão. Nesse sentido, Gerhardt (2017) afirma que a forma com a qual enxergamos o aprendizado deve partir de incômodos já propostos, observando-se, para tanto, dois pontos de partida: os saberes da pessoa e o domínio contextual em que ela se insere. Partindo dessa premissa, investigamos o questionário diagnóstico elaborado anteriormente ao projeto, e tomado como nosso objeto de análise após aprovação pelo CEP (CAAE - 85711724.0.0000.5537). Observamos, nesse questionário, os aspectos constitutivos de 9 das 12 questões, tendo em vista que os itens 1 e 2 são meramente de identificação pessoal, a saber: 1) E-mail; 2) Nome completo: Acerca das questões que analisamos, observamos aspectos relacionados à autorreflexão sobre certas vivências e a condições externas que podem influenciar o letramento acadêmico dos estudantes. Assim, para contribuir com nossa investigação, usamos o conceito de letramento acadêmico (Botelho; Neves, 2019; Koerner, 2024; Kleiman et al, 2024), bem como nos ancoramos em pressupostos teóricos dos estudos em Metacognição (Botelho, 2015; Vargas, 2012; 2017; Almeida, 2017). No que diz respeito a processos metacognitivos, corroboramos o entendimento de que, na aprendizagem escolar, “nossas ações cognitivas são passíveis de observação, análise e avaliação [...] A todo momento monitoramos nossa postura social; organizamos nosso pensamento e nossos estudos, adequando-os aos nossos objetivos [...]” (Botelho; Neves, 2019, p.191). Nesse sentido, os itens 3, 7 e 8 da sondagem diagnóstica, transcritos a seguir: 3) Você está cursando quantos componentes curriculares em BC&T/UFRN (semestre letivo)? 7) “Você está trabalhando e/ou fazendo outro curso além do BC&T/UFRN? e 8) “Você definiu uma rotina/agenda de estudos dos conteúdos ensinados nas aulas?”, evidenciam a organização dos estudos como uma ação passível de observação, análise e evolução. Afinal, a organização dos estudos não se refere a uma mera questão disciplinar, mas a uma forma de refletir sobre seu próprio processo de aprender, o que fortalece a sua autonomia. Nesse sentido, entendemos que considerar fatores como disponibilidade de tempo para estudo e o planejamento de rotina corrobora a necessidade de gerenciar a aprendizagem de leitura e escrita numa perspectiva situada, que considere estratégias de reorganização dessas ações em concomitância com as atividades já desenvolvidas pelos estudantes. Assim, a verificação da quantidade de componentes curriculares cursados pelos alunos, bem como das suas demandas laborais e acadêmicas contribui para a compreensão do docente sobre a disponibilidade dos educandos. Paralelamente, em consonância com os estudos da Linguística Aplicada, defende-se que as concepções de leitura e escrita devem ser repensadas, uma vez que entendê-las como reprodução de informações, prática reiterada há décadas nos ambientes de ensino, mostra-se uma posição bastante limitada. Nesse viés, a perspectiva meramente reprodutiva deve ceder espaço à prática da leitura considerando o gerenciamento de relações inferenciais, por meio das quais se dará a significação dos textos, e a construção de uma leitura global que fundamente o desenvolvimento de um olhar mais crítico acerca do material lido (Applegate e cols., 2002; Vargas, 2017; Nobre, 2019 apud Botelho e Neves, 2019). Diante disso, o item 11 da sondagem diagnóstica: “Você já teve, em algum momento da vida escolar, experiência com leitura e escrita? Descreva brevemente.” permite verificar, a partir da descrição dos alunos, se suas experiências com leitura e escrita foram mais voltadas a práticas meramente

reprodutivas de informação ou a atividades que exigiram deles construir inferências, dar sentido ao texto e desenvolver visão crítica. Nesse caminho, o item 5: “Você teve aulas de Língua Portuguesa regularmente no ensino médio? E no ensino fundamental?” também contribui para uma visão mais ampla das experiências prévias dos estudantes com a leitura e a escrita. Com isso, uma vez conhecendo melhor suas turmas, o professor pode otimizar o seu processo de ensino-aprendizagem com base nas vivências anteriores do seu alunado, considerando a possibilidade de, no planejamento das suas atividades, abordar mais diretamente lacunas de aprendizado que emergem da resposta a essas questões. Nesse sentido, ao compreendermos a escrita sob uma perspectiva social, entendemo-la como “uma situação comunicativa que, assim como outras situações da vida social, compreendem uma atividade coletiva, com participantes e saberes diversos, os quais mobilizam esses conhecimentos segundo interesses, intenções e objetivos individuais e metas comuns.” (Kleiman, 2007, p. 5). Assim, evidencia-se a pertinência do item 12, a seguir transcrito, “Você imagina que terá alguma dificuldade com leitura e escrita de textos no semestre? Explique por quê.”, uma vez que a resposta do aluno não se restringe às suas percepções e expectativas sobre as próprias dificuldades, mas permite que ele tome consciência de suas competências, lacunas e estratégias de leitura e escrita, contribuindo para a autorreflexão sobre o próprio desempenho. Diante disso, pode o docente traçar estratégias que mobilizem recursos cognitivos e sociais do seu alunado, adequando-os aos diferentes contextos comunicativos e objetivos coletivos. Assim, contribui também para um desenvolvimento acadêmico mais satisfatório, uma vez que o aluno, consciente tanto das lacunas quanto das possibilidades de aprendizado e da disposição, do docente, de considerar esses fatores, sinta-se mais seguro com o percurso da disciplina e veja mais sentido em cursá-la. Ainda no que diz respeito à autorreflexão, evidencia-se a pertinência dos itens 4 e 6, transcritos a seguir: 4) “Há quanto tempo concluiu o ensino médio?”; 6) “Esta é sua primeira graduação? Se não, informe até que ano esteve no ensino superior antes do atual ingresso”. Tais perguntas, cujo objetivo é investigar o percurso anterior do estudante, possibilitam ao aluno visualizar sua trajetória e refletir sobre a continuidade do contato com práticas de leitura e escrita em âmbito escolar/acadêmico. Além disso, fornece, ao docente, dados sobre a turma, ajudando-o a interpretar potencialidades ou dificuldades, em termos de os estudantes terem (ou não) mantido contato recente com o letramento escolar/acadêmico para, conforme já sinalizado neste relatório, promover um ensino mais adequado às particularidades do alunado. Por fim, cabe apontar a importância das questões 9) “Marque a opção que melhor representa o quanto aspectos de cunho particular têm afetado (ou você julga que possam afetar) negativamente seu desempenho acadêmico e sua qualidade de vida em geral”; e 10) “Se você marcou “pouco” ou “muito” na pergunta anterior, explique por quê.” Abordar essas questões em sondagens diagnósticas se mostra relevante quando compreendemos que o desenvolvimento metalinguístico deve se voltar ao aprimoramento das práticas e saberes das pessoas com a linguagem. Nesse sentido, compreende-se que as ações metacognitivas ligadas aos conhecimentos e às práticas linguísticas funcionam como elo essencial para que as pessoas se conheçam melhor, possibilitando que reconheçam tanto suas potencialidades quanto suas limitações no uso e na compreensão de suas práticas de linguagem (Gerhardt, 2017). Assim, com sondagens diagnósticas como essa, é possível promover um espaço de autoconhecimento e de tomada de consciência sobre como aspectos externos e internos impactam as práticas de linguagem na sala de aula. A partir da análise da sondagem diagnóstica, articulada à fundamentação teórica desenvolvida, apresentamos, a seguir, as possíveis contribuições da futura aplicação dessa ferramenta, evidenciando a relevância desse projeto de pesquisa para o aprimoramento das práticas de leitura e escrita e para o fortalecimento das relações de ensino e aprendizagem no ensino superior.

Conclusão

Alicerçados no conceito de letramento acadêmico, bem como em pressupostos teóricos dos estudos em Metacognição, verificamos que a sondagem diagnóstica analisada mostrou-se pertinente, uma vez que foi demonstrado o seu caráter enquanto instrumento de reflexão e autorregulação do estudante nas práticas de leitura e escrita em contexto acadêmico. Nesse sentido, a investigação evidenciou que o questionário não apenas possibilita ao docente conhecer melhor o perfil e as necessidades de seu alunado, como também permite ao estudante participar de um processo de autoconhecimento, estimulando-o a identificar suas dificuldades, potencialidades e estratégias de aprendizagem. Assim, a análise dos itens do questionário diagnóstico revelou que aspectos como a organização dos estudos, as experiências prévias com leitura e escrita, a consciência das próprias limitações e o impacto de fatores externos à vida acadêmica são dimensões essenciais para a compreensão do processo de letramento no ambiente acadêmico. Dessa forma, entendemos que a nossa pesquisa atingiu seu objetivo central, entretanto nosso objeto não se esgota, tendo-se em vista a complexidade e os desafios de incorporar sondagens diagnósticas ao planejamento docente, em consonância com os princípios de um ensino crítico e reflexivo, que reconheça a heterogeneidade dos alunos. Por fim, compreendemos que o nosso trabalho contribui para os estudos em Metacognição e os estudos em Letramento, visto que analisamos a pertinência da sondagem diagnóstica enquanto ferramenta de reflexão alinhada a uma concepção de ensino-aprendizagem como processo social, integrativo e metacognitivo.

Referências

- BOTELHO, Patrícia Ferreira; NEVES, Fabiana Esteves. Perspectivas metacognitivas e metalinguísticas para o ensino de leitura e escrita em língua materna. In: Revista do GELNE, v. 21, n. 2, p. 189-201, 2 set. 2019.
- FONSECA, João José Saraiva da. Metodologia da pesquisa científica. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.
- GERHARDT, Ana Flávia Lopes Magela. O letramento linguístico e o ensino de gramática da língua portuguesa no Brasil. In: Diadorim. Rio de Janeiro, v. 19, n. 2, p. 48–75, dez, 2017.
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Atlas, 2002
- KLEIMAN, Angela B. Letramento e suas implicações para o ensino de língua materna. In: Signo. Santa Cruz do Sul, v. 32 n 53, p. 1-25, dez, 2007.
- KLEIMAN, Angela Bustos. Os significados do letramento: uma nova perspectiva sobre a prática social da escrita. Campinas, SP: Mercado de Letras, 1995.
- KLEIMAN, A. B. et al. O conceito de Letramento na produção científica brasileira: retorno às origens, discussões para o futuro. Trabalhos em Linguística Aplicada, v. 63, n. 1, p. 240–254, 2024.

NEVES, Fabiana Esteves; BOTELHO, Patricia Ferreira (orgs.). Metacognição, práticas de leitura e de escrita: repensando estratégias de ensino. Campinas (SP): Pontes Editores, 2024.

VARGAS, Diego da Silva. O plano inferencial de leitura e o ensino de espanhol na escola brasileira: cognição distribuída, políticas cognitivas e livro didático. Tese de Doutorado em Letras Neolatinas. Faculdade de Letras, UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.