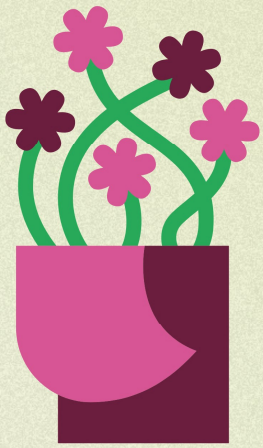
37º CICT
Ciência Delas

Anais

37º Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN





37º CICT

Ciência Delas

UFRN PROPESQ CNPq

EXPEDIENTE

APRESENTAÇÃO

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

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

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

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

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

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

PROGRAMAÇÃO

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

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

CÓDIGO: ET0147

AUTOR: FELIX LUIZ GARCAO FILHO

COAUTOR: ERICK HENRIQUE DA SILVA PAZ

COAUTOR: MATHEUS SILVA MENDES

ORIENTADOR: ORIVALDO VIEIRA DE SANTANA JUNIOR

TÍTULO: Análise e visualização dos dados gerados por redes neurais de topologia dinâmica aplicadas a dados educacionais

Resumo

Este trabalho apresenta uma abordagem de análise não supervisionada de trajetórias acadêmicas utilizando o algoritmo Growing Neural Gas (GNG), aplicado a dados educacionais de estudantes da Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O objetivo é identificar perfis acadêmicos de forma adaptativa e analisar suas mudanças ao longo dos quatro primeiros semestres. Para isso, foram utilizadas métricas relacionadas à média acadêmica, faltas e reprovações, considerando tanto informações específicas de cada semestre quanto valores acumulados. Os dados foram normalizados e submetidos ao treinamento de uma implementação adaptada do GNG, capaz de modificar dinamicamente sua estrutura por meio da inserção e remoção de neurônios. A análise dos dados e dos perfis identificados foi realizada com auxílio da Análise de Componentes Principais (PCA), enquanto as mudanças entre os perfis ao longo dos semestres foram representadas por meio de um grafo direcionado. Além dos perfis acadêmicos, a abordagem permite representar a ausência de atividade em determinados semestres por meio de um estado vazio. Os resultados obtidos demonstram a possibilidade de representar diferentes padrões acadêmicos e acompanhar suas transições ao longo da trajetória universitária, fornecendo uma visualização exploratória da evolução dos estudantes.

Palavras-chave: Mineração de Dados Educacionais; Growing Neural Gas; Educação.

TITLE: Analysis and visualization of data generated by dynamic topology neural networks applied to educational data

Abstract

This work presents an unsupervised approach for analyzing academic trajectories using the Growing Neural Gas (GNG) algorithm, applied to educational data from students at the School of Science and Technology of the Federal University of Rio Grande do Norte. The objective is to identify academic profiles adaptively and analyze their changes throughout the first four semesters. Academic performance, absences, and failures were considered, including semester-specific and cumulative information. The data were normalized and used to train an adapted GNG implementation capable of dynamically modifying its structure through neuron insertion and removal. Principal Component Analysis (PCA) was used to visualize the data and identified profiles, while changes between profiles across semesters were represented using a directed graph. The approach also represents the absence of academic activity in subsequent semesters through an empty state. The results demonstrate the potential of the approach to represent different academic patterns and track transitions throughout students' trajectories

Keywords: Educational Data Mining; Growing Neural Gas; Education.

Introdução

Ambientes acadêmicos digitais e sistemas institucionais produzem grandes volumes de dados relacionados à trajetória dos estudantes. Informações como médias acadêmicas, faltas e reprovações podem fornecer indicadores relevantes sobre diferentes padrões de desempenho e permanência ao longo da graduação. Entretanto, a análise dessas informações por meio de tabelas e indicadores isolados pode dificultar a identificação de relações entre diferentes características e de mudanças no comportamento acadêmico ao longo do tempo. Nesse contexto, técnicas de Mineração de Dados Educacionais podem ser utilizadas para identificar padrões presentes nos dados sem a necessidade de definir previamente os perfis dos estudantes. O aprendizado não supervisionado é particularmente adequado para esse tipo de análise, pois permite identificar grupos de estudantes com características semelhantes sem a utilização de rótulos previamente estabelecidos. O projeto utiliza essa abordagem para transformar registros educacionais em uma representação visual capaz de evidenciar diferentes perfis acadêmicos. Entre as técnicas de aprendizado não supervisionado, o Growing Neural Gas (GNG) apresenta como característica a capacidade de adaptar dinamicamente sua estrutura à distribuição dos dados. Diferentemente de métodos que exigem uma quantidade fixa de grupos, o GNG pode inserir e remover neurônios durante o treinamento, formando uma representação topológica dos dados. Neste trabalho, o GNG é aplicado a dados acadêmicos organizados em quatro períodos correspondentes aos primeiros semestres da trajetória dos estudantes. O objetivo é identificar perfis acadêmicos e acompanhar as transições entre esses perfis ao longo do tempo.

Metodologia

2.1 Base de dados e tratamento A base utilizada contém informações acadêmicas dos estudantes organizadas por semestre. Para cada um dos quatro semestres são consideradas cinco características: • faltas no período; • média no período; • reprovações no período; • total de faltas acumulado; • total de reprovações acumulado. Assim, cada estudante é representado por um conjunto de características que descreve sua situação

acadêmica em determinado semestre. Antes do treinamento, os dados são submetidos à normalização utilizando o método Min-Max, permitindo colocar as características em uma escala comum. Essa etapa é importante porque as variáveis possuem diferentes escalas e magnitudes. Uma particularidade da base é que estudantes que já concluíram ou deixaram o curso podem apresentar todas as métricas iguais a zero nos semestres seguintes. Para preservar essa informação durante a análise das trajetórias, registros que apresentam valor zero em todas as cinco características de determinado semestre são convertidos para valores ausentes (NaN). Esses registros são posteriormente tratados pelo algoritmo como um estado denominado “vazio”, permitindo representar a ausência de atividade acadêmica naquele período. 2.2 Treinamento do Growing Neural Gas Foi utilizada uma implementação adaptada do algoritmo Growing Neural Gas. A rede é inicializada com dois neurônios e possui um limite máximo de dez neurônios. Cada neurônio possui um vetor de características com cinco dimensões, correspondente às variáveis utilizadas na representação dos estudantes. Durante o treinamento, cada estudante é comparado aos neurônios existentes por meio da distância euclidiana. O neurônio mais próximo do estudante é identificado como Best Matching Unit (BMU). O BMU é deslocado em direção ao vetor de entrada e seus vizinhos topológicos também são atualizados, utilizando uma taxa de aprendizagem menor. A implementação acumula erros associados aos neurônios e utiliza essas informações para adaptar a estrutura da rede. Novos neurônios podem ser inseridos em regiões de maior erro, enquanto neurônios considerados redundantes podem ser removidos. Dessa forma, a topologia final não é definida previamente, mas construída durante o treinamento. O treinamento é realizado de forma sequencial para os quatro semestres. Assim, após o processamento de um semestre, os estados identificados são utilizados para registrar as transições observadas no semestre seguinte.

Resultados e Discussões

3.1 Visualização dos perfis Para facilitar a interpretação dos resultados, foi utilizada a Análise de Componentes Principais (PCA) para projetar os dados de cinco dimensões em duas dimensões. Os gráficos obtidos para os quatro semestres mostram uma distribuição dos estudantes no espaço reduzido, enquanto os neurônios aprendidos pelo GNG aparecem como pontos representativos das diferentes regiões da distribuição. A utilização do PCA nesse contexto tem finalidade principalmente visual, permitindo observar a relação espacial entre estudantes e neurônios sem alterar o processo de treinamento realizado sobre as cinco características originais. 3.2 Perfis acadêmicos Os neurônios obtidos pelo GNG podem ser interpretados como representações de diferentes perfis acadêmicos. A análise das características dos neurônios permite observar diferenças relacionadas principalmente às médias, faltas e reprovações. Alguns neurônios apresentam valores elevados de reprovações acumuladas e faltas acumuladas, enquanto outros apresentam valores menores nessas características. Essa representação permite analisar os perfis não apenas pela posição no espaço reduzido pelo PCA, mas também pelas características que compõem cada neurônio. 3.3 Fluxo das trajetórias acadêmicas A principal extensão da abordagem é a análise das mudanças de perfil entre os semestres. Cada estudante recebe um estado correspondente ao neurônio vencedor em determinado semestre. Quando o estudante muda de um neurônio para outro no semestre seguinte, essa mudança é registrada como uma transição de estado. As transições foram representadas por um grafo direcionado, no qual cada nó representa um perfil acadêmico, cada camada corresponde a um semestre, cada aresta representa a

mudança de perfil entre dois semestres e o percentual apresentado sobre a aresta representa a proporção dos estudantes que realizaram aquela transição. O estado “vazio” representa a ausência de atividade acadêmica registrada no semestre. O grafo obtido para os quatro semestres evidencia que os estudantes não permanecem necessariamente no mesmo perfil durante toda a trajetória. Existem diferentes caminhos entre os estados, com algumas transições apresentando maior frequência que outras. Entre os primeiros semestres, observa-se uma transição de aproximadamente 15,4% dos estudantes do estado 4 para o estado 3. Também aparecem transições relevantes envolvendo o estado 5, como a passagem de aproximadamente 14,2% dos estudantes do estado 7 para o estado 5 e de aproximadamente 14,6% do estado 4 para o estado 5. Ao longo dos semestres posteriores, algumas transições apresentam percentuais menores, enquanto outras permanecem mais recorrentes. O grafo também evidencia a presença do estado “vazio”, permitindo representar estudantes que deixam de apresentar atividade acadêmica nos períodos seguintes. Essa representação é relevante porque permite analisar a trajetória como um processo temporal, em vez de considerar cada semestre isoladamente. A modelagem por transições de estado permite observar como os perfis evoluem ao longo de diferentes momentos.

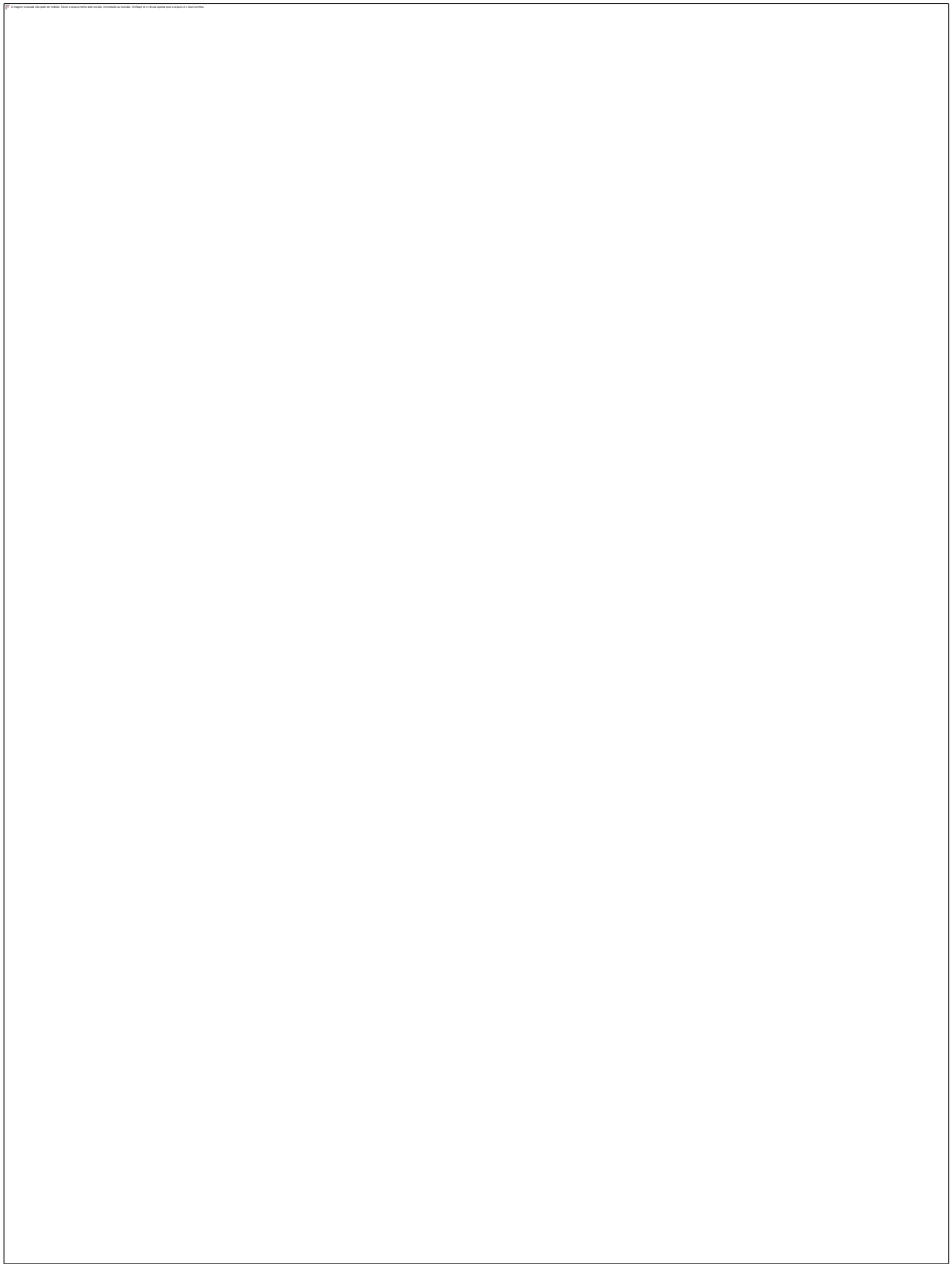
Conclusão

Este trabalho apresentou uma abordagem baseada no algoritmo Growing Neural Gas para a análise não supervisionada de trajetórias acadêmicas de estudantes da Escola de Ciência e Tecnologia da UFRN. A utilização de cinco características relacionadas à média, faltas e reprovações permitiu representar diferentes aspectos do desempenho acadêmico dos estudantes. O GNG possibilitou construir uma representação adaptativa dos dados, identificando diferentes perfis sem a necessidade de estabelecer previamente a quantidade de grupos. A utilização do PCA possibilitou visualizar a distribuição dos estudantes e a posição dos neurônios aprendidos em duas dimensões. Além disso, o registro dos neurônios vencedores em cada semestre permitiu construir um grafo direcionado das transições, evidenciando diferentes trajetórias entre os perfis identificados. A inclusão do estado “vazio” também permitiu representar a ausência de atividade acadêmica em semestres posteriores, incorporando essa informação à análise das trajetórias. Os resultados indicam que a combinação entre GNG, redução de dimensionalidade e modelagem por grafos constitui uma abordagem promissora para exploração de trajetórias acadêmicas, permitindo observar tanto as características dos perfis quanto suas mudanças ao longo do tempo. Como trabalhos futuros, pretende-se aprofundar a interpretação dos perfis identificados, avaliar quantitativamente a estabilidade dos agrupamentos e investigar a relação entre as trajetórias observadas e indicadores acadêmicos posteriores.

Referências

FRITZKE, B. A growing neural gas network learns topologies. In: Advances in Neural Information Processing Systems 7. MIT Press, 1995. p. 625–632. KOHONEN, T. Self-Organizing Maps. 3. ed. Springer, 2001. HOLMSTRÖM, J. Growing Neural Gas: experiments with GNG, GNG with utility and supervised GNG. Uppsala University, Department of Information Technology, 2002.

Anexos



analise-features-por-cluster



visualizacao-dados-kmeans



definicao-perfis-cluster-kmeans

CÓDIGO: ET0148

AUTOR: MATHEUS SILVA MENDES

COAUTOR: ERICK HENRIQUE DA SILVA PAZ

COAUTOR: FELIX LUIZ GARCAO FILHO

ORIENTADOR: ORIVALDO VIEIRA DE SANTANA JUNIOR

TÍTULO: Análise e visualização dos dados gerados por redes neurais de topologia dinâmica aplicadas a dados educacionais

Resumo

Este trabalho apresenta uma abordagem de análise não supervisionada de trajetórias acadêmicas utilizando o algoritmo Growing Neural Gas (GNG), aplicado a dados educacionais de estudantes da Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O objetivo é identificar perfis acadêmicos de forma adaptativa e analisar suas mudanças ao longo dos quatro primeiros semestres. Para isso, foram utilizadas métricas relacionadas à média acadêmica, faltas e reprovações, considerando tanto informações específicas de cada semestre quanto valores acumulados. Os dados foram normalizados e submetidos ao treinamento de uma implementação adaptada do GNG, capaz de modificar dinamicamente sua estrutura por meio da inserção e remoção de neurônios. A análise dos dados e dos perfis identificados foi realizada com auxílio da Análise de Componentes Principais (PCA), enquanto as mudanças entre os perfis ao longo dos semestres foram representadas por meio de um grafo direcionado. Além dos perfis acadêmicos, a abordagem permite representar a ausência de atividade em determinados semestres por meio de um estado vazio. Os resultados obtidos demonstram a possibilidade de representar diferentes padrões acadêmicos e acompanhar suas transições ao longo da trajetória universitária, fornecendo uma visualização exploratória da evolução dos estudantes.

Palavras-chave: Mineração de Dados Educacionais; Growing Neural Gas; Educação.

TITLE: Analysis and visualization of data generated by dynamic topology neural networks applied to educational data

Abstract

This work presents an unsupervised approach for analyzing academic trajectories using the Growing Neural Gas (GNG) algorithm, applied to educational data from students at the School of Science and Technology of the Federal University of Rio Grande do Norte. The objective is to identify academic profiles adaptively and analyze their changes throughout the first four semesters. Academic performance, absences, and failures were considered, including semester-specific and cumulative information. The data were normalized and used to train an adapted GNG implementation capable of dynamically modifying its structure through neuron insertion and removal. Principal Component Analysis (PCA) was used to visualize the data and identified profiles, while changes between profiles across semesters were represented using a directed graph. The approach also represents the absence of academic activity in subsequent semesters through an empty state. The results demonstrate the potential of the approach to represent different academic patterns and track transitions throughout students' trajectories

Keywords: Educational Data Mining; Growing Neural Gas; Education.

Introdução

Ambientes acadêmicos digitais e sistemas institucionais produzem grandes volumes de dados relacionados à trajetória dos estudantes. Informações como médias acadêmicas, faltas e reprovações podem fornecer indicadores relevantes sobre diferentes padrões de desempenho e permanência ao longo da graduação. Entretanto, a análise dessas informações por meio de tabelas e indicadores isolados pode dificultar a identificação de relações entre diferentes características e de mudanças no comportamento acadêmico ao longo do tempo. Nesse contexto, técnicas de Mineração de Dados Educacionais podem ser utilizadas para identificar padrões presentes nos dados sem a necessidade de definir previamente os perfis dos estudantes. O aprendizado não supervisionado é particularmente adequado para esse tipo de análise, pois permite identificar grupos de estudantes com características semelhantes sem a utilização de rótulos previamente estabelecidos. O projeto utiliza essa abordagem para transformar registros educacionais em uma representação visual capaz de evidenciar diferentes perfis acadêmicos. Entre as técnicas de aprendizado não supervisionado, o Growing Neural Gas (GNG) apresenta como característica a capacidade de adaptar dinamicamente sua estrutura à distribuição dos dados. Diferentemente de métodos que exigem uma quantidade fixa de grupos, o GNG pode inserir e remover neurônios durante o treinamento, formando uma representação topológica dos dados. Neste trabalho, o GNG é aplicado a dados acadêmicos organizados em quatro períodos correspondentes aos primeiros semestres da trajetória dos estudantes. O objetivo é identificar perfis acadêmicos e acompanhar as transições entre esses perfis ao longo do tempo.

Metodologia

2.1 Base de dados e tratamento A base utilizada contém informações acadêmicas dos estudantes organizadas por semestre. Para cada um dos quatro semestres são consideradas cinco características: • faltas no período; • média no período; • reprovações no período; • total de faltas acumulado; • total de reprovações acumulado. Assim, cada estudante é representado por um conjunto de características que descreve sua situação

acadêmica em determinado semestre. Antes do treinamento, os dados são submetidos à normalização utilizando o método Min-Max, permitindo colocar as características em uma escala comum. Essa etapa é importante porque as variáveis possuem diferentes escalas e magnitudes. Uma particularidade da base é que estudantes que já concluíram ou deixaram o curso podem apresentar todas as métricas iguais a zero nos semestres seguintes. Para preservar essa informação durante a análise das trajetórias, registros que apresentam valor zero em todas as cinco características de determinado semestre são convertidos para valores ausentes (NaN). Esses registros são posteriormente tratados pelo algoritmo como um estado denominado “vazio”, permitindo representar a ausência de atividade acadêmica naquele período. 2.2 Treinamento do Growing Neural Gas Foi utilizada uma implementação adaptada do algoritmo Growing Neural Gas. A rede é inicializada com dois neurônios e possui um limite máximo de dez neurônios. Cada neurônio possui um vetor de características com cinco dimensões, correspondente às variáveis utilizadas na representação dos estudantes. Durante o treinamento, cada estudante é comparado aos neurônios existentes por meio da distância euclidiana. O neurônio mais próximo do estudante é identificado como Best Matching Unit (BMU). O BMU é deslocado em direção ao vetor de entrada e seus vizinhos topológicos também são atualizados, utilizando uma taxa de aprendizagem menor. A implementação acumula erros associados aos neurônios e utiliza essas informações para adaptar a estrutura da rede. Novos neurônios podem ser inseridos em regiões de maior erro, enquanto neurônios considerados redundantes podem ser removidos. Dessa forma, a topologia final não é definida previamente, mas construída durante o treinamento. O treinamento é realizado de forma sequencial para os quatro semestres. Assim, após o processamento de um semestre, os estados identificados são utilizados para registrar as transições observadas no semestre seguinte.

Resultados e Discussões

3.1 Visualização dos perfis Para facilitar a interpretação dos resultados, foi utilizada a Análise de Componentes Principais (PCA) para projetar os dados de cinco dimensões em duas dimensões. Os gráficos obtidos para os quatro semestres mostram uma distribuição dos estudantes no espaço reduzido, enquanto os neurônios aprendidos pelo GNG aparecem como pontos representativos das diferentes regiões da distribuição. A utilização do PCA nesse contexto tem finalidade principalmente visual, permitindo observar a relação espacial entre estudantes e neurônios sem alterar o processo de treinamento realizado sobre as cinco características originais. 3.2 Perfis acadêmicos Os neurônios obtidos pelo GNG podem ser interpretados como representações de diferentes perfis acadêmicos. A análise das características dos neurônios permite observar diferenças relacionadas principalmente às médias, faltas e reprovações. Alguns neurônios apresentam valores elevados de reprovações acumuladas e faltas acumuladas, enquanto outros apresentam valores menores nessas características. Essa representação permite analisar os perfis não apenas pela posição no espaço reduzido pelo PCA, mas também pelas características que compõem cada neurônio. 3.3 Fluxo das trajetórias acadêmicas A principal extensão da abordagem é a análise das mudanças de perfil entre os semestres. Cada estudante recebe um estado correspondente ao neurônio vencedor em determinado semestre. Quando o estudante muda de um neurônio para outro no semestre seguinte, essa mudança é registrada como uma transição de estado. As transições foram representadas por um grafo direcionado, no qual cada nó representa um perfil acadêmico, cada camada corresponde a um semestre, cada aresta representa a

mudança de perfil entre dois semestres e o percentual apresentado sobre a aresta representa a proporção dos estudantes que realizaram aquela transição. O estado “vazio” representa a ausência de atividade acadêmica registrada no semestre. O grafo obtido para os quatro semestres evidencia que os estudantes não permanecem necessariamente no mesmo perfil durante toda a trajetória. Existem diferentes caminhos entre os estados, com algumas transições apresentando maior frequência que outras. Entre os primeiros semestres, observa-se uma transição de aproximadamente 15,4% dos estudantes do estado 4 para o estado 3. Também aparecem transições relevantes envolvendo o estado 5, como a passagem de aproximadamente 14,2% dos estudantes do estado 7 para o estado 5 e de aproximadamente 14,6% do estado 4 para o estado 5. Ao longo dos semestres posteriores, algumas transições apresentam percentuais menores, enquanto outras permanecem mais recorrentes. O grafo também evidencia a presença do estado “vazio”, permitindo representar estudantes que deixam de apresentar atividade acadêmica nos períodos seguintes. Essa representação é relevante porque permite analisar a trajetória como um processo temporal, em vez de considerar cada semestre isoladamente. A modelagem por transições de estado permite observar como os perfis evoluem ao longo de diferentes momentos.

Conclusão

Este trabalho apresentou uma abordagem baseada no algoritmo Growing Neural Gas para a análise não supervisionada de trajetórias acadêmicas de estudantes da Escola de Ciência e Tecnologia da UFRN. A utilização de cinco características relacionadas à média, faltas e reprovações permitiu representar diferentes aspectos do desempenho acadêmico dos estudantes. O GNG possibilitou construir uma representação adaptativa dos dados, identificando diferentes perfis sem a necessidade de estabelecer previamente a quantidade de grupos. A utilização do PCA possibilitou visualizar a distribuição dos estudantes e a posição dos neurônios aprendidos em duas dimensões. Além disso, o registro dos neurônios vencedores em cada semestre permitiu construir um grafo direcionado das transições, evidenciando diferentes trajetórias entre os perfis identificados. A inclusão do estado “vazio” também permitiu representar a ausência de atividade acadêmica em semestres posteriores, incorporando essa informação à análise das trajetórias. Os resultados indicam que a combinação entre GNG, redução de dimensionalidade e modelagem por grafos constitui uma abordagem promissora para exploração de trajetórias acadêmicas, permitindo observar tanto as características dos perfis quanto suas mudanças ao longo do tempo. Como trabalhos futuros, pretende-se aprofundar a interpretação dos perfis identificados, avaliar quantitativamente a estabilidade dos agrupamentos e investigar a relação entre as trajetórias observadas e indicadores acadêmicos posteriores.

Referências

FRITZKE, B. A growing neural gas network learns topologies. In: Advances in Neural Information Processing Systems 7. MIT Press, 1995. p. 625–632. KOHONEN, T. Self-Organizing Maps. 3. ed. Springer, 2001. HOLMSTRÖM, J. Growing Neural Gas: experiments with GNG, GNG with utility and supervised GNG. Uppsala University, Department of Information Technology, 2002.

CÓDIGO: ET0184

AUTOR: ERICK HENRIQUE DA SILVA PAZ

COAUTOR: FELIX LUIZ GARCAO FILHO

COAUTOR: MATHEUS SILVA MENDES

ORIENTADOR: ORIVALDO VIEIRA DE SANTANA JUNIOR

TÍTULO: Análise e visualização dos dados gerados por redes neurais de topologia dinâmica aplicadas a dados educacionais

Resumo

Este trabalho apresenta uma abordagem de análise não supervisionada de trajetórias acadêmicas utilizando o algoritmo Growing Neural Gas (GNG), aplicado a dados educacionais de estudantes da Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O objetivo é identificar perfis acadêmicos de forma adaptativa e analisar suas mudanças ao longo dos quatro primeiros semestres. Para isso, foram utilizadas métricas relacionadas à média acadêmica, faltas e reprovações, considerando tanto informações específicas de cada semestre quanto valores acumulados. Os dados foram normalizados e submetidos ao treinamento de uma implementação adaptada do GNG, capaz de modificar dinamicamente sua estrutura por meio da inserção e remoção de neurônios. A análise dos dados e dos perfis identificados foi realizada com auxílio da Análise de Componentes Principais (PCA), enquanto as mudanças entre os perfis ao longo dos semestres foram representadas por meio de um grafo direcionado. Além dos perfis acadêmicos, a abordagem permite representar a ausência de atividade em determinados semestres por meio de um estado vazio. Os resultados obtidos demonstram a possibilidade de representar diferentes padrões acadêmicos e acompanhar suas transições ao longo da trajetória universitária, fornecendo uma visualização exploratória da evolução dos estudantes.

Palavras-chave: Mineração de Dados Educacionais; Growing Neural Gas; Educação.

TITLE: Analysis and visualization of data generated by dynamic topology neural networks applied to educational data

Abstract

This work presents an unsupervised approach for analyzing academic trajectories using the Growing Neural Gas (GNG) algorithm, applied to educational data from students at the School of Science and Technology of the Federal University of Rio Grande do Norte. The objective is to identify academic profiles adaptively and analyze their changes throughout the first four semesters. Academic performance, absences, and failures were considered, including semester-specific and cumulative information. The data were normalized and used to train an adapted GNG implementation capable of dynamically modifying its structure through neuron insertion and removal. Principal Component Analysis (PCA) was used to visualize the data and identified profiles, while changes between profiles across semesters were represented using a directed graph. The approach also represents the absence of academic activity in subsequent semesters through an empty state. The results demonstrate the potential of the approach to represent different academic patterns and track transitions throughout students' trajectories

Keywords: Educational Data Mining; Growing Neural Gas; Education.

Introdução

Ambientes acadêmicos digitais e sistemas institucionais produzem grandes volumes de dados relacionados à trajetória dos estudantes. Informações como médias acadêmicas, faltas e reprovações podem fornecer indicadores relevantes sobre diferentes padrões de desempenho e permanência ao longo da graduação. Entretanto, a análise dessas informações por meio de tabelas e indicadores isolados pode dificultar a identificação de relações entre diferentes características e de mudanças no comportamento acadêmico ao longo do tempo. Nesse contexto, técnicas de Mineração de Dados Educacionais podem ser utilizadas para identificar padrões presentes nos dados sem a necessidade de definir previamente os perfis dos estudantes. O aprendizado não supervisionado é particularmente adequado para esse tipo de análise, pois permite identificar grupos de estudantes com características semelhantes sem a utilização de rótulos previamente estabelecidos. O projeto utiliza essa abordagem para transformar registros educacionais em uma representação visual capaz de evidenciar diferentes perfis acadêmicos. Entre as técnicas de aprendizado não supervisionado, o Growing Neural Gas (GNG) apresenta como característica a capacidade de adaptar dinamicamente sua estrutura à distribuição dos dados. Diferentemente de métodos que exigem uma quantidade fixa de grupos, o GNG pode inserir e remover neurônios durante o treinamento, formando uma representação topológica dos dados. Neste trabalho, o GNG é aplicado a dados acadêmicos organizados em quatro períodos correspondentes aos primeiros semestres da trajetória dos estudantes. O objetivo é identificar perfis acadêmicos e acompanhar as transições entre esses perfis ao longo do tempo.

Metodologia

2.1 Base de dados e tratamento A base utilizada contém informações acadêmicas dos estudantes organizadas por semestre. Para cada um dos quatro semestres são consideradas cinco características: • faltas no período; • média no período; • reprovações no período; • total de faltas acumulado; • total de reprovações acumulado. Assim, cada estudante é representado por um conjunto de características que descreve sua situação

acadêmica em determinado semestre. Antes do treinamento, os dados são submetidos à normalização utilizando o método Min-Max, permitindo colocar as características em uma escala comum. Essa etapa é importante porque as variáveis possuem diferentes escalas e magnitudes. Uma particularidade da base é que estudantes que já concluíram ou deixaram o curso podem apresentar todas as métricas iguais a zero nos semestres seguintes. Para preservar essa informação durante a análise das trajetórias, registros que apresentam valor zero em todas as cinco características de determinado semestre são convertidos para valores ausentes (NaN). Esses registros são posteriormente tratados pelo algoritmo como um estado denominado “vazio”, permitindo representar a ausência de atividade acadêmica naquele período. 2.2 Treinamento do Growing Neural Gas Foi utilizada uma implementação adaptada do algoritmo Growing Neural Gas. A rede é inicializada com dois neurônios e possui um limite máximo de dez neurônios. Cada neurônio possui um vetor de características com cinco dimensões, correspondente às variáveis utilizadas na representação dos estudantes. Durante o treinamento, cada estudante é comparado aos neurônios existentes por meio da distância euclidiana. O neurônio mais próximo do estudante é identificado como Best Matching Unit (BMU). O BMU é deslocado em direção ao vetor de entrada e seus vizinhos topológicos também são atualizados, utilizando uma taxa de aprendizagem menor. A implementação acumula erros associados aos neurônios e utiliza essas informações para adaptar a estrutura da rede. Novos neurônios podem ser inseridos em regiões de maior erro, enquanto neurônios considerados redundantes podem ser removidos. Dessa forma, a topologia final não é definida previamente, mas construída durante o treinamento. O treinamento é realizado de forma sequencial para os quatro semestres. Assim, após o processamento de um semestre, os estados identificados são utilizados para registrar as transições observadas no semestre seguinte.

Resultados e Discussões

3.1 Visualização dos perfis Para facilitar a interpretação dos resultados, foi utilizada a Análise de Componentes Principais (PCA) para projetar os dados de cinco dimensões em duas dimensões. Os gráficos obtidos para os quatro semestres mostram uma distribuição dos estudantes no espaço reduzido, enquanto os neurônios aprendidos pelo GNG aparecem como pontos representativos das diferentes regiões da distribuição. A utilização do PCA nesse contexto tem finalidade principalmente visual, permitindo observar a relação espacial entre estudantes e neurônios sem alterar o processo de treinamento realizado sobre as cinco características originais. 3.2 Perfis acadêmicos Os neurônios obtidos pelo GNG podem ser interpretados como representações de diferentes perfis acadêmicos. A análise das características dos neurônios permite observar diferenças relacionadas principalmente às médias, faltas e reprovações. Alguns neurônios apresentam valores elevados de reprovações acumuladas e faltas acumuladas, enquanto outros apresentam valores menores nessas características. Essa representação permite analisar os perfis não apenas pela posição no espaço reduzido pelo PCA, mas também pelas características que compõem cada neurônio. 3.3 Fluxo das trajetórias acadêmicas A principal extensão da abordagem é a análise das mudanças de perfil entre os semestres. Cada estudante recebe um estado correspondente ao neurônio vencedor em determinado semestre. Quando o estudante muda de um neurônio para outro no semestre seguinte, essa mudança é registrada como uma transição de estado. As transições foram representadas por um grafo direcionado, no qual cada nó representa um perfil acadêmico, cada camada corresponde a um semestre, cada aresta representa a

mudança de perfil entre dois semestres e o percentual apresentado sobre a aresta representa a proporção dos estudantes que realizaram aquela transição. O estado “vazio” representa a ausência de atividade acadêmica registrada no semestre. O grafo obtido para os quatro semestres evidencia que os estudantes não permanecem necessariamente no mesmo perfil durante toda a trajetória. Existem diferentes caminhos entre os estados, com algumas transições apresentando maior frequência que outras. Entre os primeiros semestres, observa-se uma transição de aproximadamente 15,4% dos estudantes do estado 4 para o estado 3. Também aparecem transições relevantes envolvendo o estado 5, como a passagem de aproximadamente 14,2% dos estudantes do estado 7 para o estado 5 e de aproximadamente 14,6% do estado 4 para o estado 5. Ao longo dos semestres posteriores, algumas transições apresentam percentuais menores, enquanto outras permanecem mais recorrentes. O grafo também evidencia a presença do estado “vazio”, permitindo representar estudantes que deixam de apresentar atividade acadêmica nos períodos seguintes. Essa representação é relevante porque permite analisar a trajetória como um processo temporal, em vez de considerar cada semestre isoladamente. A modelagem por transições de estado permite observar como os perfis evoluem ao longo de diferentes momentos.

Conclusão

Este trabalho apresentou uma abordagem baseada no algoritmo Growing Neural Gas para a análise não supervisionada de trajetórias acadêmicas de estudantes da Escola de Ciência e Tecnologia da UFRN. A utilização de cinco características relacionadas à média, faltas e reprovações permitiu representar diferentes aspectos do desempenho acadêmico dos estudantes. O GNG possibilitou construir uma representação adaptativa dos dados, identificando diferentes perfis sem a necessidade de estabelecer previamente a quantidade de grupos. A utilização do PCA possibilitou visualizar a distribuição dos estudantes e a posição dos neurônios aprendidos em duas dimensões. Além disso, o registro dos neurônios vencedores em cada semestre permitiu construir um grafo direcionado das transições, evidenciando diferentes trajetórias entre os perfis identificados. A inclusão do estado “vazio” também permitiu representar a ausência de atividade acadêmica em semestres posteriores, incorporando essa informação à análise das trajetórias. Os resultados indicam que a combinação entre GNG, redução de dimensionalidade e modelagem por grafos constitui uma abordagem promissora para exploração de trajetórias acadêmicas, permitindo observar tanto as características dos perfis quanto suas mudanças ao longo do tempo. Como trabalhos futuros, pretende-se aprofundar a interpretação dos perfis identificados, avaliar quantitativamente a estabilidade dos agrupamentos e investigar a relação entre as trajetórias observadas e indicadores acadêmicos posteriores.

Referências

FRITZKE, B. A growing neural gas network learns topologies. In: Advances in Neural Information Processing Systems 7. MIT Press, 1995. p. 625–632. KOHONEN, T. Self-Organizing Maps. 3. ed. Springer, 2001. HOLMSTRÖM, J. Growing Neural Gas: experiments with GNG, GNG with utility and supervised GNG. Uppsala University, Department of Information Technology, 2002.

CÓDIGO: ET0235

AUTOR: ALLEX THIERRY DE PAULA LIMA BARBOSA

ORIENTADOR: EFRAIN PANTALEON MATAMOROS

TÍTULO: Melhorar bancada usando lazer 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.

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.

Introdução

A proposta desta pesquisa está relacionada ao estudo da difração e da interferência da luz, e tendo como uma de suas principais fundamentações o experimento da dupla fenda de Thomas Young. Esse experimento possui grande relevância para o estudo da natureza ondulatória da luz, uma vez que, ele permite observar a formação de um padrão característico de regiões claras e escuras a partir da interação entre ondas luminosas. Dessa forma, a reprodução experimental desse fenômeno possibilita aproximar os conceitos teóricos da óptica de sua observação prática, contribuindo para uma compreensão mais acessível e didática dos princípios físicos envolvidos.

A interferência ocorre quando duas ou mais ondas se superpõem em uma mesma região do espaço. Quando as ondas coerentes chegam em fase, suas amplitudes se somam, caracterizando a interferência construtiva e assim produzindo regiões de maior intensidade luminosa. Entretanto, quando chegam em oposição de fase, ocorre a interferência destrutiva, resultando em regiões de menor intensidade. No experimento de dupla fenda, essa superposição produz no anteparo um padrão de franjas claras e escuras, cuja distribuição está relacionada a parâmetros como o comprimento de onda da fonte luminosa, a distância entre as fendas e a distância entre as fendas e o anteparo.

Apesar da importância desses fenômenos para o estudo da óptica, sua abordagem no ensino pode ocorrer predominantemente por meio de representações teóricas, diagramas, esquemas e simulações. Embora esses recursos sejam relevantes para a compreensão conceitual, a experimentação prática permite visualizar diretamente os fenômenos estudados, realizar medições e estabelecer relações entre as grandezas físicas envolvidas. Nesse contexto, torna-se relevante buscar alternativas experimentais de fácil reprodução e baseadas em componentes acessíveis, possibilitando não apenas a observação qualitativa da interferência, mas também a obtenção de dados para análises quantitativas.

Os princípios relacionados a esse fenômeno estão presentes em diferentes aplicações científicas e tecnológicas, especialmente em técnicas de interferometria e em instrumentos destinados a medições de elevada precisão. Entre suas aplicações encontramos sistemas empregados em pesquisas astronômicas, caracterização óptica e até mesmo na detecção de ondas gravitacionais. Assim, compreender experimentalmente a interferência representa não apenas o estudo de um fenômeno fundamental da óptica, mas também o contato com princípios físicos presentes em tecnologias e pesquisas contemporâneas.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo melhorar uma bancada experimental utilizando lasers comerciais e fendas para reproduzir o fenômeno de interferência da luz, buscando uma alternativa acessível, ajustável e de fácil reprodução. Pretendemos, dessa maneira, favorecer a aproximação entre teoria e prática, possibilitando a visualização do fenômeno e a realização de medições quantitativas que contribuam para o estudo dos princípios ópticos envolvidos.

Metodologia

O projeto foi desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), no laboratório URA, vinculado à Escola de Ciências e Tecnologia (ECT). O desenvolvimento experimental foi realizado a partir do aproveitamento e da adaptação de componentes disponíveis no laboratório, juntamente com materiais comerciais e de fácil acesso. A metodologia foi organizada em etapas de seleção dos componentes, montagem do sistema óptico, alinhamento da fonte luminosa, observação do padrão produzido, realização de medições e, posteriormente, aprimoramento dos elementos empregados na configuração experimental.

Como fontes luminosas, foram utilizados lasers comerciais nas cores verde e vermelha, escolhidos por apresentarem dimensões reduzidas, facilidade de aquisição e emissão adequada para os testes ópticos propostos. Por conta das análises, foram considerados comprimentos de onda aproximados de 532 nm para o laser verde e 650 nm para o laser vermelho. Durante os testes, foi buscado posicionar a fonte luminosa de maneira que o feixe incidisse sobre o elemento difrator, permitindo a projeção do padrão luminoso sobre um anteparo constituído por papel ou parede.

Na configuração experimental inicialmente utilizada, o elemento difrator foi produzido a partir de um pente de dentes finos e regularmente espaçados. O espaçamento entre os dentes foi estimado em aproximadamente 1 mm. Essa configuração permitiu obter múltiplas aberturas aproximadamente paralelas para a passagem da luz. Embora a proposta tenha como referência o experimento de dupla fenda de Young, a presença de múltiplas aberturas faz com que essa configuração se aproxime experimentalmente do comportamento de uma rede de difração. Essa característica foi considerada durante a interpretação dos padrões luminosos observados.

Para a realização dos experimentos, o laser foi inicialmente posicionado a aproximadamente 1 cm do elemento difrator. O anteparo destinado à observação foi colocado a cerca de 83 cm do sistema. O alinhamento foi realizado por meio de ajustes na posição relativa entre fonte luminosa, elemento difrator e anteparo, buscando obter maior nitidez e regularidade na distribuição das franjas. Os testes foram realizados com variações de posicionamento e alinhamento, observando a influência desses parâmetros na formação do padrão projetado.

Após a obtenção de um padrão visualmente definido, foram realizadas observações diretas e medições da separação entre regiões de máxima intensidade luminosa. Para relacionar os valores experimentais com a previsão teórica, foi considerada a aproximação para pequenos ângulos, na qual o espaçamento entre franjas consecutivas pode ser determinado pela relação $\Delta y = \lambda L/d$, sendo Δy a separação entre franjas, λ o comprimento de onda da fonte luminosa, L a distância entre o elemento difrator e o anteparo e d o espaçamento entre as aberturas.

Utilizando $L \approx 0{,}83$ m e $d \approx 1 \times 10^{-3}$ m, foram determinados valores teóricos para as duas fontes luminosas consideradas. Para o laser verde, com $\lambda \approx 532$ nm, foi obtido uma separação teórica de aproximadamente 0,44 mm entre franjas. Para o laser vermelho, considerando $\lambda \approx 650$ nm, o valor calculado foi de aproximadamente 0,54 mm. Esses valores foram utilizados como referência para posterior comparação com as medições experimentais.

Além da montagem óptica, foram avaliadas possibilidades de reaproveitamento e adaptação de componentes eletrônicos disponíveis no laboratório. Entre os materiais utilizados nos testes encontram-se multímetros, potenciômetros e fontes de alimentação anteriormente empregadas em outros equipamentos. Os multímetros foram utilizados para acompanhamento de grandezas elétricas durante os testes dos componentes, enquanto potenciômetros e sistemas de alimentação foram avaliados como alternativas para proporcionar maior controle sobre a fonte luminosa utilizada no experimento.

A partir das limitações observadas na configuração inicial, uma etapa posterior do trabalho foi direcionada ao aprimoramento da montagem experimental. Foram avaliadas novas fendas e componentes destinados a melhorar o posicionamento e o alinhamento da luz, bem como alternativas para utilização dos lasers comerciais de forma mais controlada.

Os dados obtidos nas diferentes etapas foram analisados por meio da comparação entre os valores calculados teoricamente e as medidas realizadas experimentalmente. Também foram consideradas possíveis fontes de incerteza, especialmente aquelas relacionadas ao alinhamento da fonte luminosa, à determinação da distância entre o elemento difrator e o anteparo, ao espaçamento real entre as aberturas e à medição das franjas projetadas. A análise desses fatores foi utilizada tanto para avaliar a configuração experimental quanto para orientar as modificações propostas para seu aprimoramento.

Resultados e Discussões

Os testes realizados com a montagem experimental possibilitaram a observação de padrões de distribuição de intensidade luminosa após a incidência do laser sobre o elemento difrator. Utilizando o laser verde, foi possível visualizar no anteparo uma região central de maior intensidade acompanhada por uma sequência de máximos luminosos distribuídos lateralmente, conforme apresentado na Figura - Fenômeno optico da dupla fenda. A observação desse padrão demonstra que a passagem da luz pelas aberturas modifica sua distribuição espacial, permitindo visualizar experimentalmente fenômenos associados à difração e à interferência.

Inicialmente, foi utilizado como elemento difrator um pente com dentes regularmente espaçados em aproximadamente 1 mm. Embora essa solução tenha permitido a obtenção de um padrão luminoso bem definido, a existência de múltiplas aberturas faz com que o sistema apresente características mais próximas às de uma rede de difração do que às de uma configuração ideal de dupla fenda. Esse resultado foi importante para o desenvolvimento do trabalho, pois, além de demonstrar a possibilidade de observar o fenômeno utilizando materiais de fácil obtenção, evidenciou a necessidade de aprimorar o elemento utilizado para reproduzir de maneira mais controlada a configuração de duas fendas.

A análise quantitativa foi realizada considerando a relação aproximada $\Delta y = \lambda L/d$, em que Δy representa o espaçamento entre máximos consecutivos, λ o comprimento de onda da fonte luminosa, L a distância entre o elemento difrator e o anteparo e d o

espaçamento entre as aberturas. Para uma distância de aproximadamente 83 cm entre o elemento difrator e o anteparo e um espaçamento estimado de 1 mm, foram obtidos valores teóricos de aproximadamente 0,44 mm para o laser verde, considerando $\lambda \approx 532$ nm, e 0,54 mm para o laser vermelho, considerando $\lambda \approx 650$ nm.

As medições realizadas no padrão experimental indicaram espaçamentos da ordem de 0,5 mm. Esse resultado apresenta a mesma ordem de grandeza dos valores calculados teoricamente, indicando compatibilidade entre a observação experimental e o comportamento previsto pelo modelo adotado. A diferença esperada entre os valores calculados para os lasers verde e vermelho também evidencia a influência do comprimento de onda sobre o espaçamento das franjas: se mantendo constantes a distância até o anteparo e o espaçamento entre as aberturas, o aumento do comprimento de onda resulta em maior separação entre máximos consecutivos.

Entretanto, a comparação quantitativa deve considerar as limitações da configuração experimental. O espaçamento entre os dentes do pente foi tratado de forma aproximada, assim como o posicionamento relativo entre laser, elemento difrator e anteparo. Pequenas variações no alinhamento do feixe, na distância de propagação e na geometria das aberturas podem alterar a nitidez e o posicionamento do padrão observado. Além disso, a utilização de múltiplas aberturas introduz diferenças em relação ao modelo idealizado de dupla fenda, constituindo uma das principais limitações identificadas na configuração inicial.

A identificação dessas limitações orientou uma nova etapa do trabalho, voltada ao aprimoramento dos componentes da montagem. Entre as modificações propostas está a produção de peças por impressão 3D contendo duas aberturas paralelas, buscando substituir a configuração de múltiplas aberturas utilizada inicialmente. A fabricação dessas peças possibilitou estabelecer uma geometria específica para novos testes e representa uma tentativa de aproximar a montagem da configuração de dupla fenda que fundamenta teoricamente o projeto.

Além do desenvolvimento das novas peças, foram avaliadas alternativas para melhorar o controle da fonte luminosa utilizando lasers comerciais e componentes eletrônicos de fácil obtenção. Essa etapa busca proporcionar maior controle das condições experimentais e facilitar a repetição dos ensaios. Os testes dessa configuração aprimorada permanecem em desenvolvimento e, portanto, seus resultados não são apresentados como conclusivos neste trabalho.

Os resultados obtidos até o momento demonstram, portanto, duas contribuições principais. A primeira corresponde à reprodução experimental de padrões associados à interferência e à difração utilizando uma configuração simples e materiais acessíveis. A segunda corresponde à identificação das limitações dessa configuração inicial, que serviram como ponto de partida para o desenvolvimento de novos componentes e para o aprimoramento da montagem. Dessa forma, o processo experimental não se restringiu à observação do fenômeno, mas também envolveu a análise crítica da configuração utilizada e a proposição de modificações destinadas a melhorar sua estabilidade, controle e reprodutibilidade.

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.

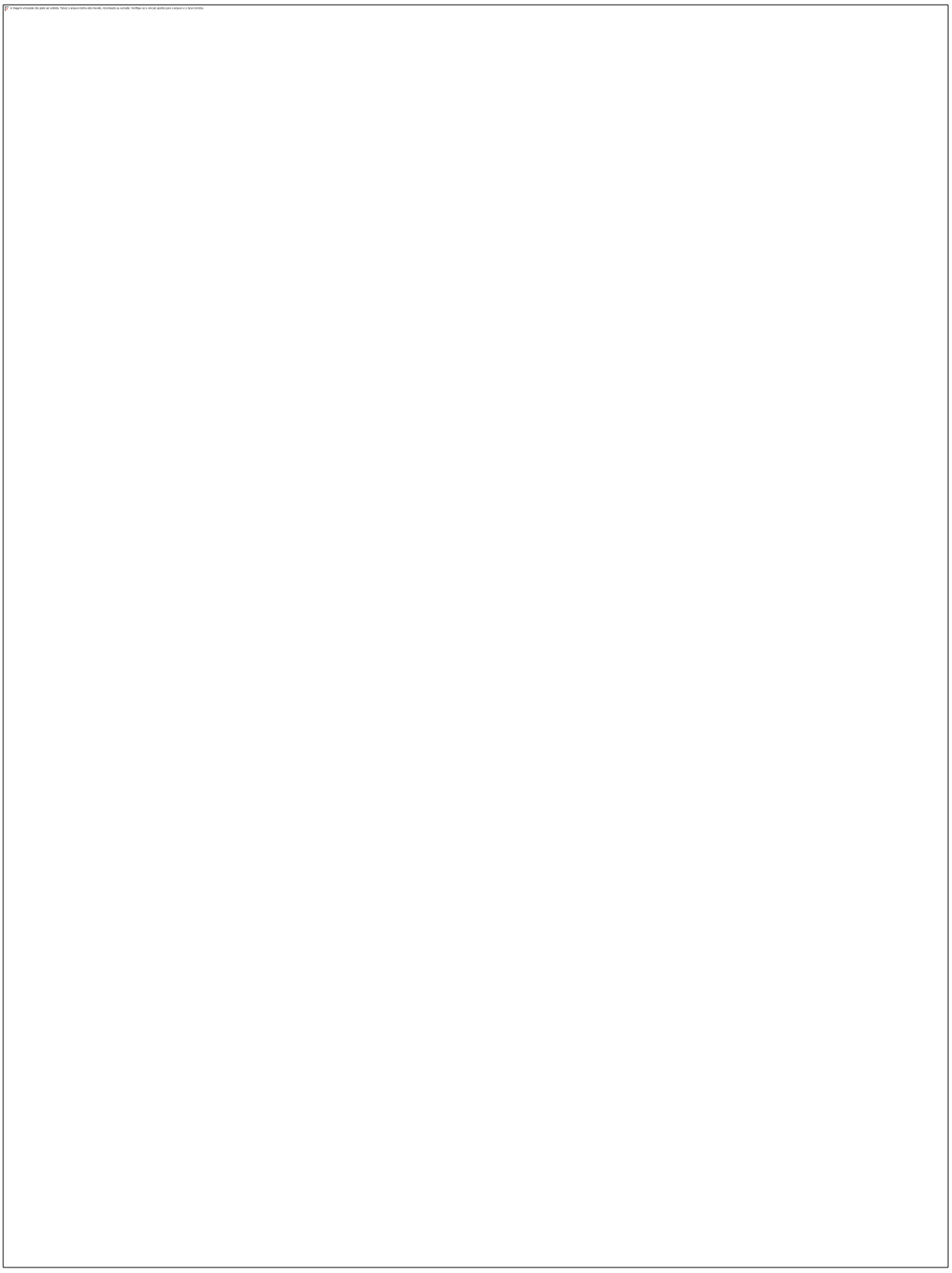
BRYSON, B. Breve História de Quase Tudo. Companhia das Letras; 1ª Edição, 2005.

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.

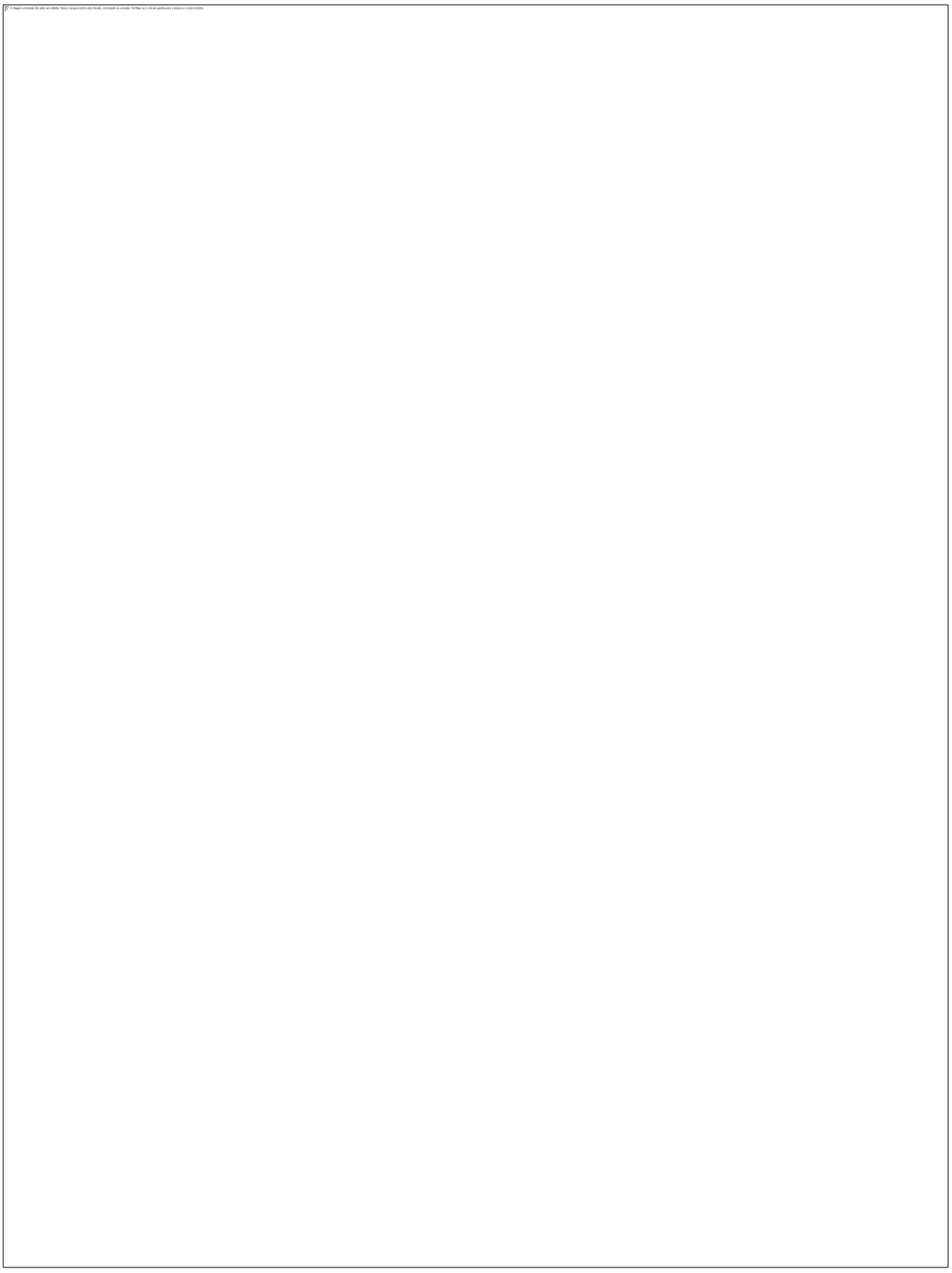
DOUBLE-SLIT INTERFERENCE WITH A CALIPER. Disponível em: 29 agosto de 2025. 51

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

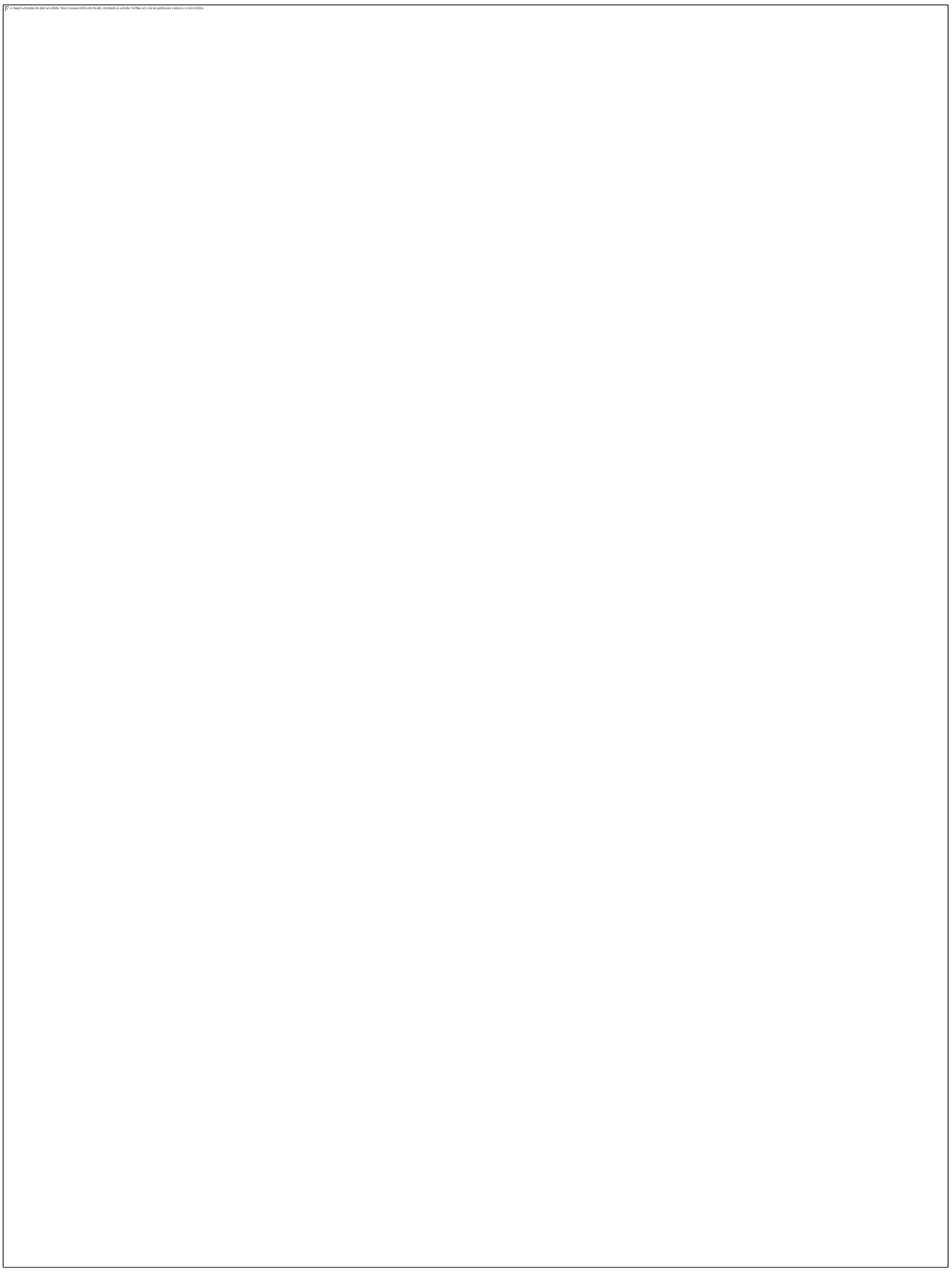
Anexos



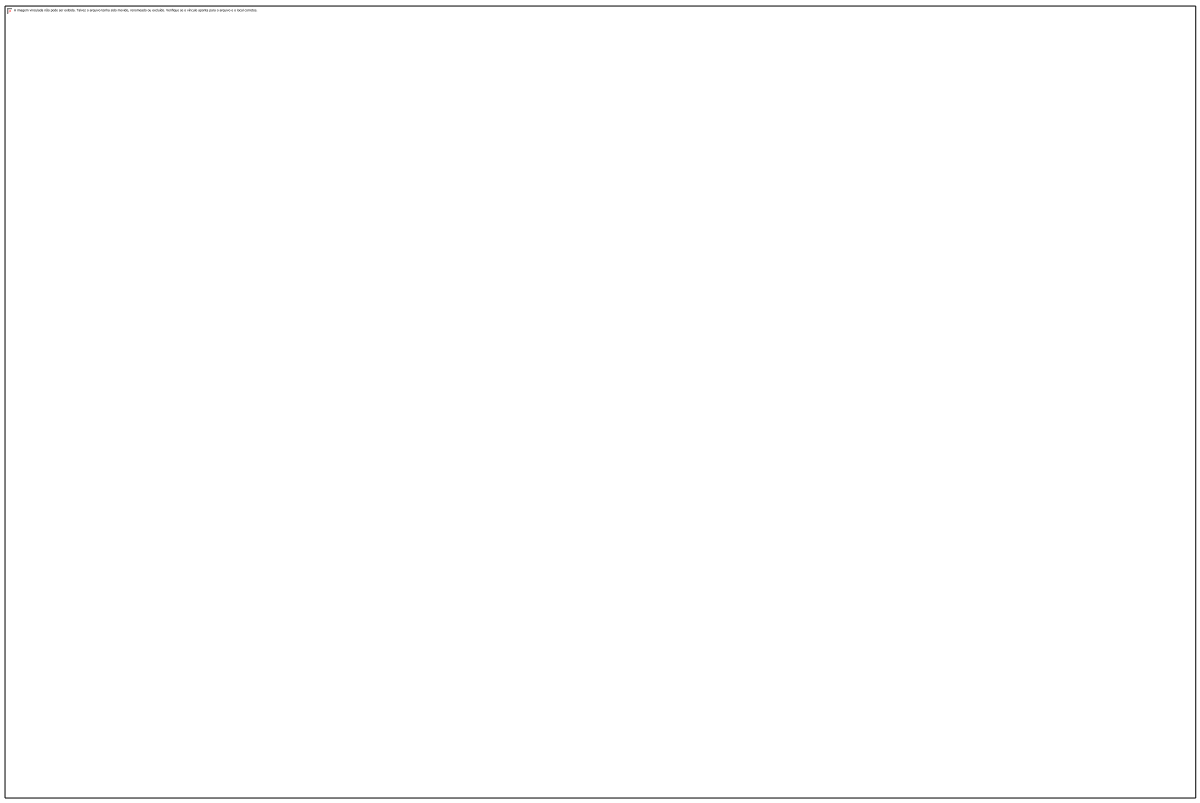
Diferentes vistas do componente de dupla fenda utilizado no aprimoramento da montagem experimental.



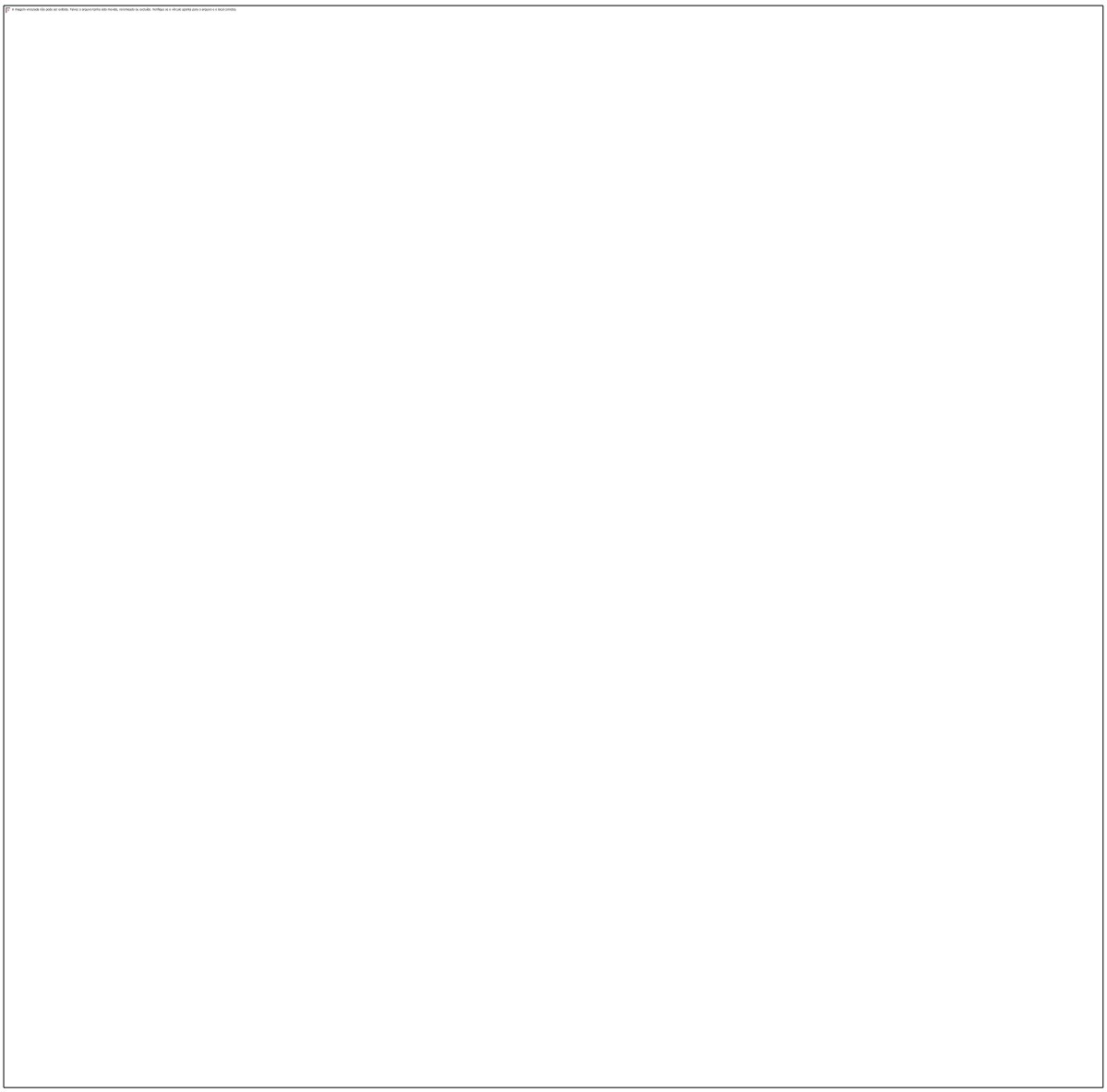
Diferentes vistas do componente de dupla fenda utilizado no aprimoramento da montagem experimental.



Diferentes vistas do componente de dupla fenda utilizado no aprimoramento da montagem experimental.



Representação esquemática do fenômeno de interferência da luz em uma configuração de dupla fenda



Fenômeno optico da dupla fenda

CÓDIGO: ET0382

AUTOR: LUCAS AUGUSTO SPINOLA PINTO

ORIENTADOR: ORIVALDO VIEIRA DE SANTANA JUNIOR

TÍTULO: Estudo de métodos de inteligência artificial generativa para criar um agente para auxiliar na avaliação contínua do estudante

Resumo

A avaliação contínua em disciplinas de programação depende de acompanhar muitas evidências ao longo do semestre, o que consome tempo do professor e da monitoria, sobretudo em turmas de laboratório numerosas. Este trabalho investigou métodos de inteligência artificial generativa e reuniu esse conhecimento em uma plataforma web de apoio à avaliação contínua, integrada ao SIGAA e utilizada na disciplina de Lógica de Programação da Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN. A plataforma organiza atividades de código, corrigidas de forma automática por casos de teste e acompanhadas por métricas de tentativas e tempo de resolução, além de quizzes de múltipla escolha, incluindo uma modalidade ao vivo com participação em tempo real, e questões discursivas. Nas questões discursivas entra a parte generativa, na qual a resposta do aluno é comparada à resposta esperada por similaridade semântica com embeddings, e um modelo de linguagem de grande escala, o Llama acessado pela API da Groq, gera um retorno estruturado com nota, resumo, pontos a revisar e sugestões de estudo. Esse material fica registrado por aluno e por turma, o que dá ao professor uma visão contínua do progresso. A plataforma foi usada por cerca de sessenta estudantes, com uso concentrado nas atividades e nos quizzes, e os resultados indicam retorno mais rápido ao aluno e menor sobrecarga da monitoria, desde que mantida a supervisão humana sobre as avaliações geradas.

Palavras-chave: IA generativa; avaliação contínua; ensino de programação

TITLE: Study of generative artificial intelligence methods to build an agent to assist in the continuous evaluation of students

Abstract

Continuous evaluation in programming courses relies on tracking many pieces of evidence throughout the semester, which takes time from the professor and the teaching assistants, especially in large lab classes. This work investigated generative artificial intelligence methods and gathered that knowledge into a web platform to support continuous evaluation, integrated with SIGAA and used in the Programming Logic course at the School of Science and Technology of UFRN. The platform organizes

coding activities, graded automatically by test cases and tracked with metrics of attempts and solving time, along with multiple choice quizzes, including a live mode with real time participation, and open questions. The generative part acts on the open questions, where the student answer is compared to the expected answer through semantic similarity with embeddings, and a large language model, the Llama model accessed through the Groq API, produces structured feedback with a grade, a summary, points to review and study suggestions. This material is logged per student and per class, giving the professor a continuous view of progress. The platform was used by around sixty students, with usage concentrated on activities and quizzes, and the results indicate faster feedback to the student and lower workload for the teaching assistants, as long as human supervision over the generated evaluations is kept.

Keywords: Generative AI; continuous assessment; programming education

Introdução

O acompanhamento do estudante ao longo de uma disciplina diz muito mais sobre a sua aprendizagem do que uma prova única no final do semestre, e essa é a ideia por trás da avaliação contínua, na qual pequenas evidências reunidas em cada aula ajudam a enxergar onde o aluno avança e onde trava. Em disciplinas de lógica de programação essa coleta é intensa, já que cada exercício resolvido, cada tentativa de código e cada resposta escrita carregam informação sobre o raciocínio de quem está aprendendo a programar. O gargalo aparece nas turmas de laboratório, que costumam ser numerosas, pois o professor e a monitoria não conseguem corrigir e devolver tudo com a rapidez necessária, e boa parte do retorno chega tarde, quando o aluno já seguiu adiante sem entender o erro.

Ao mesmo tempo, os avanços em aprendizado profundo mudaram a forma como as máquinas lidam com linguagem. A partir da arquitetura Transformer proposta por Vaswani e colaboradores, que organizou o processamento de texto em torno de mecanismos de atenção, surgiram os modelos de linguagem de grande escala, capazes de interpretar enunciados, comentar código e redigir explicações com boa fluência. Trabalhos como o de Devlin e colaboradores, com o modelo BERT, mostraram o valor de representações pré-treinadas de linguagem, e o de Brown e colaboradores evidenciou que modelos grandes resolvem tarefas novas com poucos exemplos. A obra de Goodfellow e colaboradores organiza boa parte dessa fundamentação. Sobre essa base cresceu a inteligência artificial generativa, voltada a produzir texto novo a partir de padrões aprendidos, e com ela a chance de automatizar justamente a parte mais trabalhosa da correção, que é o retorno escrito e individualizado às respostas abertas do aluno.

Este trabalho se insere no projeto de pesquisa sobre algoritmos de aprendizado profundo aplicados a problemas de inovação tecnológica, desenvolvido na Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN, e nasce de uma necessidade concreta da disciplina de Lógica de Programação. A pesquisa evoluiu de uma versão anterior, que funcionava como um bot educacional no Discord apoiado por um serviço de processamento de linguagem, e foi reconstruída como uma plataforma web integrada ao SIGAA, na qual um modelo generativo assume a avaliação das respostas discursivas. O objetivo geral foi estudar métodos de inteligência artificial generativa e aplicá-los na construção de um agente que

auxilie a avaliação contínua do estudante. Entre os objetivos específicos estão levantar a bibliografia sobre modelos generativos e sua aplicação em educação, projetar e implementar a plataforma e o mecanismo de avaliação, integrar o sistema ao fluxo real da disciplina e observar o seu uso em sala, com atenção aos limites e riscos da tecnologia.

Metodologia

O trabalho combinou estudo teórico, desenvolvimento de software e uso em contexto real de sala de aula. A primeira etapa foi de revisão bibliográfica, com leitura sobre aprendizado profundo, modelos de linguagem de grande escala, geração de texto e embeddings, além de boas práticas de aplicação dessas técnicas em educação.

Na etapa de desenvolvimento, o sistema foi construído como uma plataforma web, com interface em Angular e uma API em Django com Django REST Framework, integrada ao SIGAA por meio de autenticação e da sincronização de turmas, alunos e docentes. Recursos em tempo real, como os quizzes ao vivo e as notificações, foram implementados com Django Channels e Redis, e o banco de dados utilizado foi o PostgreSQL. A implantação na infraestrutura da Escola de Ciências e Tecnologia foi feita com contêineres Docker e uma esteira de integração contínua no GitLab.

A plataforma reúne três tipos de avaliação que alimentam o acompanhamento contínuo. As atividades de código trazem enunciado, exemplo e casos de teste, e a resposta do aluno é corrigida de forma automática pela execução contra esses casos, registrando quantos casos passaram, o tempo de execução, o número de tentativas e o tempo até a resolução. Os quizzes são questões de múltipla escolha, com uma variação ao vivo em que a turma responde ao mesmo tempo e a participação é acompanhada em tempo real. As questões discursivas, chamadas de narrativas, são o ponto em que a inteligência artificial generativa atua.

Para avaliar uma resposta discursiva, o sistema gera representações vetoriais da resposta esperada e da resposta do aluno, usando o modelo de embeddings text-embedding-3-small da OpenAI, com uma alternativa local baseada em vetorização por hashing da biblioteca scikit-learn quando a chave de acesso não está disponível, e mede a proximidade entre as duas por similaridade de cosseno, o que produz uma estimativa inicial de nota. Em seguida, um modelo de linguagem de grande escala, o Llama 4 Scout acessado pela API da Groq, recebe a resposta esperada e a resposta do aluno junto a uma instrução que define o papel de avaliador pedagógico, e devolve um retorno estruturado com nota de zero a dez, um resumo curto, dois pontos a revisar e três sugestões de estudo. A temperatura do modelo foi mantida em zero para tornar a correção mais estável, e a nota, o resumo e a similaridade ficam registrados junto à resposta.

A validação foi feita pelo uso real na disciplina de Lógica de Programação, observando o comportamento da correção automática de código, o funcionamento dos quizzes e a qualidade do retorno gerado para as respostas discursivas, sempre com o professor acompanhando e podendo revisar o que a ferramenta produzia.

Resultados e Discussões

O principal resultado deste ciclo é a plataforma em funcionamento e implantada na infraestrutura da Escola de Ciências e Tecnologia, integrada ao SIGAA e em uso na disciplina de Lógica de Programação. Ela foi utilizada por cerca de sessenta estudantes das turmas de laboratório, e o uso se concentrou nas atividades de código e nos quizzes, que passaram a oferecer correção imediata e liberar a monitoria de boa parte da conferência manual.

No caso das atividades de código, a correção automática por casos de teste devolve na hora se a solução passou, quantos casos acertou e quanto tempo levou, e o registro do número de tentativas e do tempo de resolução dá ao professor uma leitura contínua da dificuldade de cada questão e de cada aluno. Nos quizzes, incluindo a modalidade ao vivo, a turma responde e o retorno aparece de imediato, o que ajuda a medir a compreensão durante a própria aula. Nas questões discursivas, a parte generativa entregou o ganho mais claro, já que gerar retorno escrito e individualizado é justamente o que mais consome tempo em uma correção manual, e o modelo passou a produzir nota, resumo, pontos a revisar e sugestões de estudo de forma padronizada.

A combinação de similaridade semântica com o retorno do modelo de linguagem se mostrou útil, porém expôs limitações que merecem cuidado. A estimativa por embeddings depende da qualidade da resposta esperada cadastrada, e a alternativa local por hashing é mais fraca que a versão baseada em API, o que pode aproximar respostas apenas por vocabulário parecido. O modelo de linguagem, por sua vez, pode gerar avaliações incorretas com aparência de segurança, então a nota e o comentário foram tratados como apoio ao professor e não como decisão final, com a temperatura em zero para reduzir a variação entre execuções. Esses pontos reforçam a discussão sobre uso responsável de inteligência artificial generativa na educação, na qual o ganho de eficiência precisa vir acompanhado de supervisão humana e de critérios claros de uso.

Conclusão

O estudo mostrou que métodos de inteligência artificial generativa podem apoiar a avaliação contínua em disciplinas de programação quando integrados a uma plataforma que já organiza o dia a dia da turma. Ao reunir atividades de código corrigidas por casos de teste, quizzes com uma variação ao vivo e questões discursivas avaliadas por similaridade semântica somada a um modelo de linguagem de grande escala, o sistema aproxima o retorno do momento em que o aluno produz a resposta e diminui a sobrecarga da monitoria, mantendo tudo registrado por aluno e por turma como insumo para o professor.

A reconstrução do projeto, que partiu de um bot educacional e chegou a uma plataforma web integrada ao SIGAA e implantada na Escola de Ciências e Tecnologia, mostrou

também que a tecnologia não substitui o docente, e sim o apoia, já que a geração de avaliações incorretas e a dependência da qualidade da resposta esperada exigem supervisão e regras de uso bem definidas. Como continuidade, pretende-se avaliar a ferramenta de forma mais sistemática, com métricas de qualidade das notas e do retorno gerado e com a participação dos estudantes, além de aprimorar a etapa de similaridade e explorar o uso de material da própria disciplina para tornar as respostas do modelo mais alinhadas ao conteúdo trabalhado em aula.

Referências

BROWN, Tom et al. Language models are few-shot learners. In: Advances in Neural Information Processing Systems, 2020.

DEVLIN, Jacob et al. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv preprint arXiv:1810.04805, 2018.

GOODFELLOW, Ian; BENGIO, Yoshua; COURVILLE, Aaron. Deep learning. Cambridge: MIT Press, 2016.

TOUVRON, Hugo et al. LLaMA: open and efficient foundation language models. arXiv preprint arXiv:2302.13971, 2023.

VASWANI, Ashish et al. Attention is all you need. In: Advances in Neural Information Processing Systems, 2017.

CÓDIGO: ET0427

AUTOR: VICTOR DANIEL BEVENUTO DE MEDEIROS

COAUTOR: DAVIDSON NUNES DE OLIVEIRA

COAUTOR: GUILHERME AVELINO DE LIMA MENDES

COAUTOR: YASMIM ILIADA CURY RODRIGUES

COAUTOR: DEBORA INGRID DA SILVA GONCALVES

ORIENTADOR: FILIPE MARTEL DE MAGALHAES BORGES

TÍTULO: Influência do Tratamento Térmico na Perovskita Dupla $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ Sintetizada por Combustão visando Aplicações Fotovoltaicas

Resumo

A busca por materiais para conversão de energia solar tem ampliado o interesse em perovskitas devido à possibilidade de ajuste de suas propriedades. Nesse contexto, a perovskita dupla $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ apresenta forte potencial para essa aplicação. A síntese foi realizada por combustão assistida por ureia rica, seguida de calcinação a 1000 °C por 6h (taxa de 10 °C/min). As amostras (antes e após a calcinação) foram caracterizadas por Difração de Raios X (DRX, Shimadzu XRD-7000, Cu-Kα) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV, Hitachi TM3000). Os resultados de DRX indicaram que, antes da calcinação, o padrão cristalino era menos definido. Após o tratamento, observou-se maior definição das reflexões com picos compatíveis com a estrutura de perovskita dupla (2θ ≈ 32°, 47° e 59°), comparando-se à carta ICSD-19785 (La_2CoMnO_6). As imagens de MEV evidenciaram mudanças morfológicas pós-calcinação, destacando-se a maior consolidação dos aglomerados. Conclui-se que o tratamento térmico favoreceu a cristalização e a reorganização estrutural, sugerindo a formação da perovskita dupla $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$. Contudo, devido à ausência de referência cristalográfica com correspondência exata para esta composição, faz-se necessário o refinamento de Rietveld para confirmar a estrutura obtida e avaliar a possível presença de fases secundárias.

Palavras-chave: perovskita dupla. Calcinação. Síntese por combustão.

TITLE: Influence of Heat Treatment on the $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ Double Perovskite Synthesized by Combustion Targeting Photovoltaic Applications

Abstract

The search for materials for solar energy conversion has increased the interest in perovskites due to the possibility of tuning their properties. In this context, the double perovskite $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ shows strong potential for this application. The synthesis was performed by urea-rich assisted combustion, followed by calcination at 1000 °C for 6 h (heating rate of 10 °C/min). The samples (before and after calcination) were characterized by X-ray Diffraction (XRD, Shimadzu XRD-7000, Cu-Kα) and Scanning Electron Microscopy (SEM, Hitachi TM3000). The XRD results indicated that, before calcination, the crystalline pattern was less defined. After the treatment, a higher definition of the reflections was observed, with peaks compatible with the double perovskite structure ($2\theta \approx 32°$, 47°, and 59°), compared to the ICSD-19785 crystallographic card (La_2CoMnO_6). The SEM images evidenced morphological changes post-calcination, highlighting a greater consolidation of the agglomerates. It is concluded that the thermal treatment favored the crystallization and structural reorganization, suggesting the formation of the $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ double perovskite. However, due to the absence of a crystallographic reference with an exact match for this composition, Rietveld refinement is necessary to confirm the obtained structure and evaluate the possible presence of secondary phases.

Keywords: Double perovskite. Calcination. Combustion synthesis.

Introdução

A busca por fontes de energia limpa e por tecnologias capazes de reduzir os impactos ambientais associados à geração convencional de eletricidade tem impulsionado o desenvolvimento de novos materiais para a conversão de energia solar em eletricidade, um dos materiais mais comuns utilizados é filme fino possuindo na sua composição cádmio e telureto (CdTe)[1]. No contexto dos materiais utilizados em tecnologias fotovoltaicas, destacam-se as estruturas do tipo perovskita devido às suas propriedades ópticas e eletrônicas favoráveis, incluindo elevada capacidade de absorção de luz. Apesar disso, as perovskitas mais eficientes empregadas em células solares são predominantemente baseadas em chumbo (Pb), o que representa um importante desafio ambiental devido à toxicidade desse elemento [2]. Entre as diferentes possibilidades estruturais para substituir os materiais baseados em chumbo, destacam-se as perovskitas duplas, representadas pela fórmula geral $A_2BB'O_6$. Por não levarem chumbo em sua síntese, elas se apresentam como uma alternativa menos tóxica e mais sustentável. Além disso, essa estrutura desperta interesse devido à ampla possibilidade de modificar sua composição química e, consequentemente, suas propriedades estruturais e eletrônicas, tornando essa classe relevante para o desenvolvimento de novos absorvedores e dispositivos solares [3].

Nesse contexto, este trabalho inicia uma investigação da síntese da perovskita dupla $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ pelo método de combustão assistida por ureia rica, seguida de calcinação a 1000 °C/6h. A caracterização das amostras foi realizada por Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), permitindo avaliar as alterações estruturais e morfológicas promovidas pelo tratamento térmico. A análise dos resultados foi realizada por meio da comparação dos difratogramas com e sem tratamento térmico usando cartas cristalográficas de referência e da avaliação da

morfologia do material, buscando verificar a formação da estrutura de perovskita dupla e contribuir para o estudo desse material como uma possível alternativa para aplicações relacionadas à conversão de energia solar.

Metodologia

Foram realizados cálculos estequiométricos para a síntese da perovskita dupla $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ pelo método de combustão assistida por ureia rica[4, 5]. Os sais precursores, constituídos por nitratos e cloreto dos elementos de interesse, foram dissolvidos em 150 mL de água destilada e submetidos à agitação magnética com aquecimento a aproximadamente 90 °C por 30 minutos, até a obtenção de uma solução homogênea. Após a evaporação parcial da água e o aumento da viscosidade da solução, a mistura foi transferida para um recipiente metálico e submetida a aquecimento por resistência elétrica, atingindo aproximadamente 300 °C. Nessa condição, ocorreu a reação de combustão, caracterizada pela redução acentuada da umidade, liberação de fumaça e posterior formação de uma chama amarelada, resultando na obtenção de um pó precursor. Após o término da combustão, o material foi resfriado, feito as caracterizações e macerado manualmente em almofariz com pistilo, visando à desaglomeração e homogeneização do pó. Posteriormente, o material precursor foisubmetido à etapa de calcinação em forno elétrico tipo mufla, com aquecimento até 1000 °C, utilizando taxa de aquecimento de 10 °C/min e permanência por 6 horas nessa temperatura, então caracterizado novamente. O tratamento térmico foi empregado para favorecer a eliminação de resíduos provenientes da combustão e promover a cristalização e a organização estrutural do material, possibilitando o desenvolvimento da fase de perovskita dupla [6].

As análises foram conduzidas tanto no material obtido diretamente após a rota de combustão quanto na amostra submetida à calcinação, permitindo a comparação das alterações no comportamento cristalino decorrentes do tratamento térmico. Após a realização da rota de combustão com calcinação(CC) e sem calcinação(SC) foram obtidos dois pós precursores submetidos às seguintes caracterizações.

Difração de Raios X (DRX), onde caracteriza a estrutura de materiais cristalinos utilizando a interação dos raios-X com planos atômicos da amostra gerando padrões de difração permitindo identificar as fases cristalinas do material, determinar o tamanho dos cristalitos e os parâmetros da célula unitária usando o equipamento difratômetro Shimadzu XRD-6000, utilizando radiação Cu-Kα (λ = 1,5406 Å) na faixa de 0° a 60° sem calcinação (SC) e 10° a 80° com calcinação (CC) em 2θ, com velocidade de varredura de 1° min^{-1} [7].

A análise da morfologia e topografia superficial das amostras foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em um equipamento Hitachi TM3000. Em conjunto, a composição química foi determinada por meio de um detector de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) [8].

Desta forma as caracterizações permitem avaliar as características superficiais, a morfologia e sua estrutura cristalina antes e com calcinação.

Resultados e Discussões

Para avaliar a formação e a evolução estrutural da perovskita dupla $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ obtida pelo método de combustão assistida por ureia rica, foram utilizadas as técnicas de difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), considerando duas etapas de análise do material. Inicialmente, a amostra obtida diretamente após a síntese foi caracterizada, evidenciando que as condições empregadas não foram suficientes para a formação da fase cristalina desejada. Em seguida, o material foi submetido à calcinação a 1000 °C/6h, sendo posteriormente observadas alterações significativas no padrão cristalino, com o surgimento de picos que apresentam concordância com as características esperadas para a estrutura de perovskita dupla, conforme comparação com cartas cristalográficas de referência[9].

A comparação entre as amostras antes e com calcinação permite avaliar a influência do tratamento térmico sobre as características do material, considerando tanto as modificações estruturais identificadas por DRX quanto às alterações morfológicas observadas por MEV. Dessa forma, a análise comparativa busca relacionar as mudanças verificadas após a calcinação com a possível formação e maior intensidade dos picos característicos da fase de perovskita dupla. A identificação e confirmação das fases cristalinas presentes devem, entretanto, ser complementadas por métodos de análise mais aprofundados, como o refinamento de Rietveld[10, 11].

A comparação dos difratogramas obtidos sem e com a calcinação evidencia mudanças significativas no comportamento cristalino do mesmo material $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$. Na condição sem calcinação (SC), apresentada na Figura 1, observa-se um padrão com maior quantidade de picos ao longo da faixa analisada, além de sinais de menor intensidade e maior irregularidade, indicando que a energia liberada na rota de combustão, isoladamente, não foi suficiente para promover uma organização cristalina compatível com a fase desejada. Esse comportamento pode estar relacionado à presença de fases intermediárias e à formação incompleta da estrutura durante a síntese por combustão [12].

Com calcinação a 1000 °C/6h, apresentada na Figura 2, observa-se uma alteração expressiva no perfil de difração, com a definição de picos mais intensos e característicos, indicando que o tratamento térmico favoreceu a cristalinidade e a reorganização estrutural do material [13]. Neste difratograma, foram observados picos compatíveis com a estrutura de perovskita dupla, especialmente nas regiões de aproximadamente $2\theta \approx 32°$, 47° e 59°, considerando a comparação com uma carta cristalográfica Inorganic Crystal Structure Database ICSD-19785, Figura 3. Embora essas semelhanças indicam que a formação da perovskita dupla é uma possibilidade consistente para o material obtido, que apesar da semelhança a carta cristalográfica não apresenta a exata composição $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$, a composição da carta cristalográfica comparada é La1,5Ca0,5CoMnO6. Dessa forma, os resultados obtidos por DRX fornecem indícios favoráveis à formação da fase de perovskita dupla após a calcinação, porém uma confirmação mais precisa das fases presentes e da efetiva formação da estrutura desejada requer uma nova caracterização por meio do refinamento de Rietveld,

permitindo uma análise mais detalhada do padrão cristalográfico e das possíveis fases secundárias [14].

A análise morfológica da amostra $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ com calcinação e sem calcinação foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme apresentado na Figura 4. Na condição sem calcinação, observa-se uma morfologia formada por aglomerados irregulares, com superfície rugosa e diferentes conformações ao longo da região analisada. Também são identificadas regiões de aspecto mais compacto e outras com estruturas mais abertas, evidenciando a irregularidade morfológica do material obtido diretamente após finalizar a rota de combustão. Essas características estão associadas ao processo de síntese por combustão e às condições em que o pó precursor foi formado [15]. Nesta mesma etapa, a análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) realizada na amostra sem calcinação detectou a presença do elemento químico cálcio (Ca). Esse resultado é de suma importância, pois corrobora que a substituição parcial desejada para a composição $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ havia ocorrido com sucesso logo após a rota de combustão.

Com calcinação (CC) a 1000 °C/6h, conforme apresentado na Figura 4, observa-se uma alteração no aspecto superficial do material, com aglomerados visualmente mais consolidados, principalmente nas regiões centrais das imagens. A superfície continua apresentando rugosidade e irregularidade, porém a morfologia mostra-se mais compacta quando comparada à condição sem calcinação. Essa mudança pode estar relacionada à ação do tratamento térmico, que favorece a reorganização da estrutura do material durante a etapa de calcinação [16].

A comparação das imagens da Figura 4 indica, portanto, que o tratamento térmico promoveu modificações visíveis na morfologia do material, principalmente quanto ao aspecto e à consolidação dos aglomerados. Entretanto, a análise por MEV, nas condições apresentadas, permite apenas uma avaliação qualitativa da morfologia, não sendo suficiente para determinar quantitativamente características como tamanho médio, distribuição ou dimensão das estruturas observadas. Dessa forma, os resultados de MEV devem ser interpretados em conjunto com os dados de DRX, que indicaram maior organização cristalina após a calcinação. Essa confirmação composicional do EDS complementa essa caracterização, à evolução estrutural identificada no DRX, sem utilizar a análise morfológica como evidência isolada para a confirmação da formação da perovskita dupla [17].

Conclusão

O estudo demonstra que a síntese da perovskita dupla $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ pelo método de combustão assistida por ureia rica sofre forte influência do tratamento térmico em suas características morfológicas e estruturais. A análise inicial por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) na amostra sem calcinação foi fundamental para detectar a presença de cálcio (Ca), confirmando que a substituição parcial planejada para a composição ocorreu com sucesso logo após a combustão. As caracterizações conjuntas por Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) evidenciaram que o pó precursor não calcinado apresentava irregularidade morfológica e um padrão cristalino pouco organizado. No entanto, após a etapa de calcinação a 1000 °C/6h,

observou-se uma expressiva cristalização e reorganização microestrutural do material. Esse tratamento térmico promoveu a consolidação dos aglomerados e o surgimento de picos de difração compatíveis com a estrutura de uma perovskita dupla. Apesar de a correlação entre as técnicas fornecer indícios favoráveis à formação da perovskita dupla $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$, a ausência de uma carta cristalográfica com a exata composição impede a confirmação definitiva da estrutura apenas por comparação visual dos difratogramas. Dessa forma, conclui-se que uma nova caracterização por refinamento de Rietveld é uma etapa futura necessária para validar com precisão o modelo estrutural e quantificar possíveis fases secundárias. Os resultados deste trabalho estabelecem uma base inicial sólida para a continuidade deste material, destacando seu potencial como uma alternativa promissora para o desenvolvimento de novas tecnologias de conversão de energia solar.

Referências

[1] DUAN, L. et al. CdTe-based thin film photovoltaics: recent advances, current challenges and future prospects. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 255, p. 112289, 2023. Disponível em:https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112289. Acesso em: 29 ago. 2026.

[2] KUMAR, A. et al. Recent trends and challenges in lead-free perovskite solar cells: a critical review. ACS Applied Energy Materials, v. 7, n. 4, p. 1382-1397, 2024.

[3] NYANGIWE, Nangamso Nathaniel; BINGWA, Ndzondelelo. A review of transition metal-based double perovskite oxides for photovoltaic applications. Next Materials, v. 13, p. 103022, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2026.103022. Acesso em: 29 ago. 2026.

[4] GOMES, A. A. et al. Structural and magnetic properties of Ln_2CoMnO_6 (Ln = Dy and La) produced by combustion synthesis. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, v. 26, p. 2521–2524, 2013.

[5] OROZCO GIL, S.; TOSCANI, L. M.; LARRONDO, S. A.; LAMAS, D. G. Synthesis of $Sr_2(Co_{1.1};Mo_{0.9})O_{6-\delta}$ double perovskite and its electrochemical performance in the oxygen reduction reaction. Ceramics International, v. 50, n. 24, pt. B, p. 53867-53876, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.239. Acesso em: 29 ago. 2026.

[6] SHAH, Jamal; ALI, Asad; AHMAD, Tanveer; KHAN, Alamgir; KNANI, Salah; TIRTH, Vineet; ALGAHTANI, Ali; ZAMAN, Abid. Structural, optical, vibrational, and dielectric properties of an Ni^{2+}-doped Sr_2MnWO_6 double perovskite for wireless applications. RSC Advances, v. 15, n. 46, p. 38836-38845, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1039/d5ra06378g. Acesso em: 29 ago. 2026.

[7] ZHANG, X.; WANG, L.; CHEN, Y. Application of X-ray diffraction in studying catalysis and solid-state chemistry. Chemical Reviews, v. 120, n. 18, p. 9077-9111, 2020.

[8] ALI, A.; ZHANG, N.; SANTOS, R. 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.

[9] JESUS, Jônathas Rafael de; BUFAIÇAL, Leandro; BITTAR, Eduardo Matzenbacher. The spontaneous exchange bias effect in $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ series. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 556, 169402, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169402. Acesso em:29 ago. 2026.

[10] SHEREEF, A.; ALEENA, P. A.; KUNJUMON, J.; JOSE, A. K.; THOMAS, S. A.; TOMY, M.; XAVIER, T. S.; HUSSAIN, S.; SAJAN, D. Third order nonlinear optical properties and electrochemical performance of La_2CoMnO_6 double perovskite. Materials Science and Engineering: B, v. 289, p. 116262, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116262. Acesso em: 29 ago. 2026.

[11] RIETVELD, H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. Journal of Applied Crystallography, v. 2, n. 2, p. 65–71, 1969. Disponível em: https://doi.org/10.1107/S0021889869006558. Acesso em: 29 ago.2026.

[12] DARA, Mina; HASSANPOUR, Mohammad; ALSHAMSI, Hassan Abbas; BALADI, Mahin; SALAVATI-NIASARI, Masoud. Green sol–gel auto combustion synthesis and characterization of double perovskite Tb_2ZnMnO_6 nanoparticles and a brief study of photocatalytic activity. RSC Advances, v. 11, n. 14, p. 8228–8238, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1039/d0ra10400k. Acesso em: 29 ago.2026.

[13] COSTILLA-AGUILAR, S. U.; ESCUDERO-BERZAL, M. J.; CIENFUEGOS-PELAES, R. F.; AGUILAR-MARTÍNEZ, J. A. Double perovskite $La_{1.8}Sr_{0.2}CoFeO_{5+\delta}$ as a cathode material for intermediate temperature solid oxide fuel cells. Journal of Alloys and Compounds, v. 862, 158025, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158025. Acesso em: 29 ago.2026.

[14] SHARMA, Reena; HOODA, Neelam; HOODA, Ashima; KHASA, Satish. Structural, dielectric and magnetic study of double perovskite La_2CoMnO_6. Physica B: Condensed Matter, v. 668, 415473, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415473. Acesso em: 29 ago. 2026.

[15] KAKADE, S. A.; PRASAD, R. K.; KULKARNI, A. R. Influence of fuel on morphology of LSM powders obtained by solution combustion synthesis. Powder Technology, v. 269, p. 17–25, 2015. Disponível em:https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.037. Acesso em: 29 ago. 2026.

[16] DARA, Mina; HASSANPOUR, Mohammad; ALSHAMSI, Hassan Abbas; BALADI, Mahin; SALAVATI-NIASARI, Masoud. Green sol–gel auto combustion synthesis and characterization of double perovskite Tb_2ZnMnO_6 nanoparticles and a brief study of photocatalytic activity. RSC Advances, v. 11, p. 8228–8238, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1039/d0ra10400k. Acesso em: 29 ago. 2026.

[17] HRISTIANS, Jeffrey A.; CAMPAGNA, Rory; McGOVERN, Ian J.; TRAN, Brian. Nanoscale characterization of halide perovskite phase stability with scanning electron

microscopy. Journal of Materials Chemistry A, v. 13, p. 27301–27307, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1039/d5ta03723a. Acesso em: 29 ago. 2026.

Anexos

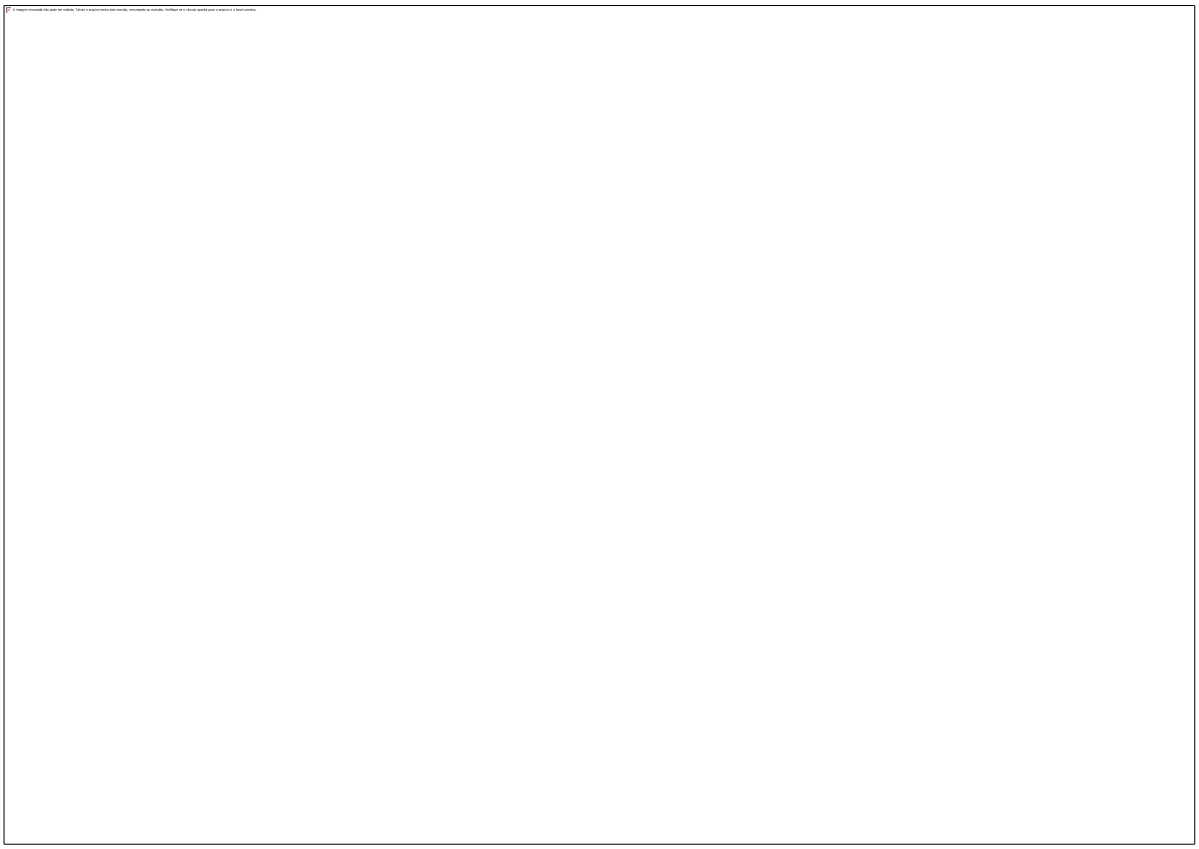


Figura 1 - Difratogramas da amostra sem calcinação(DRX) para a análise estrutural do material

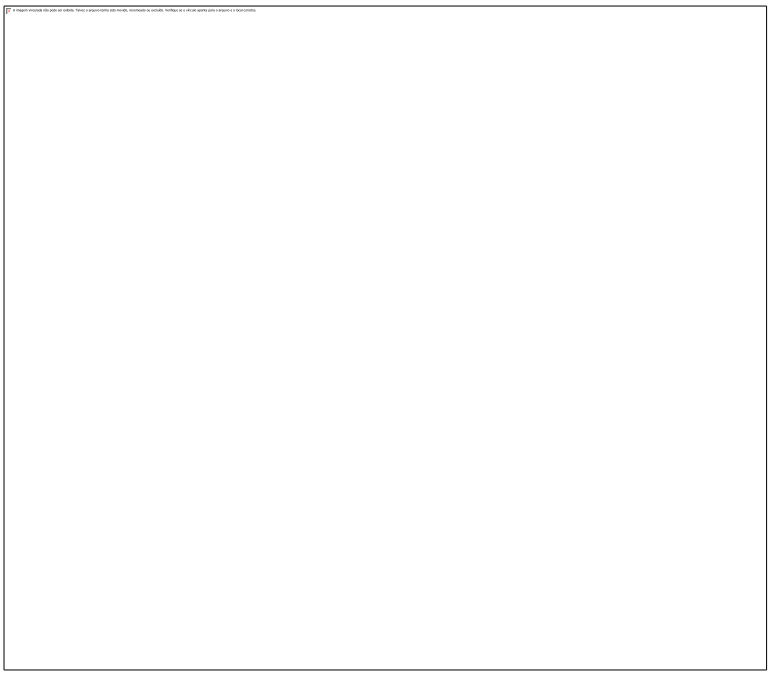


Figura 2 - Difratogramas da amostra com calcinação (CC) a 1000º C (DRX) para a análise estrutural do material.

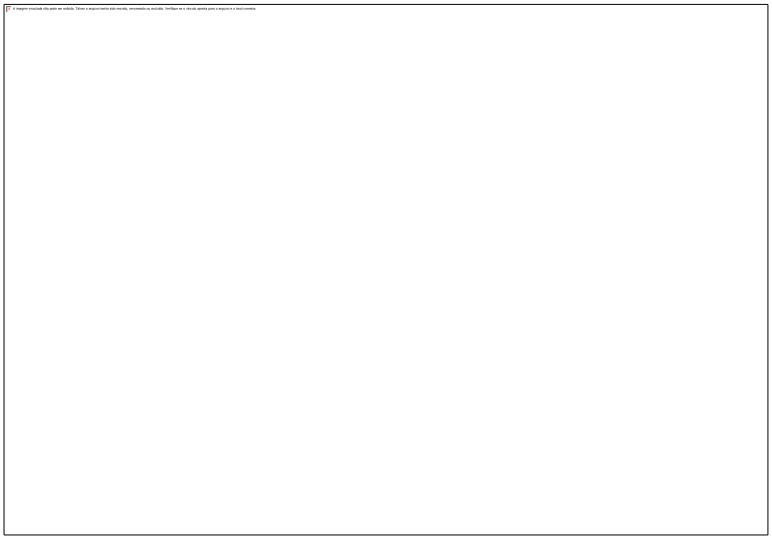


Figura 3 - Carta cristalográfica Inorganic Crystal Structure Database ICSD-19785

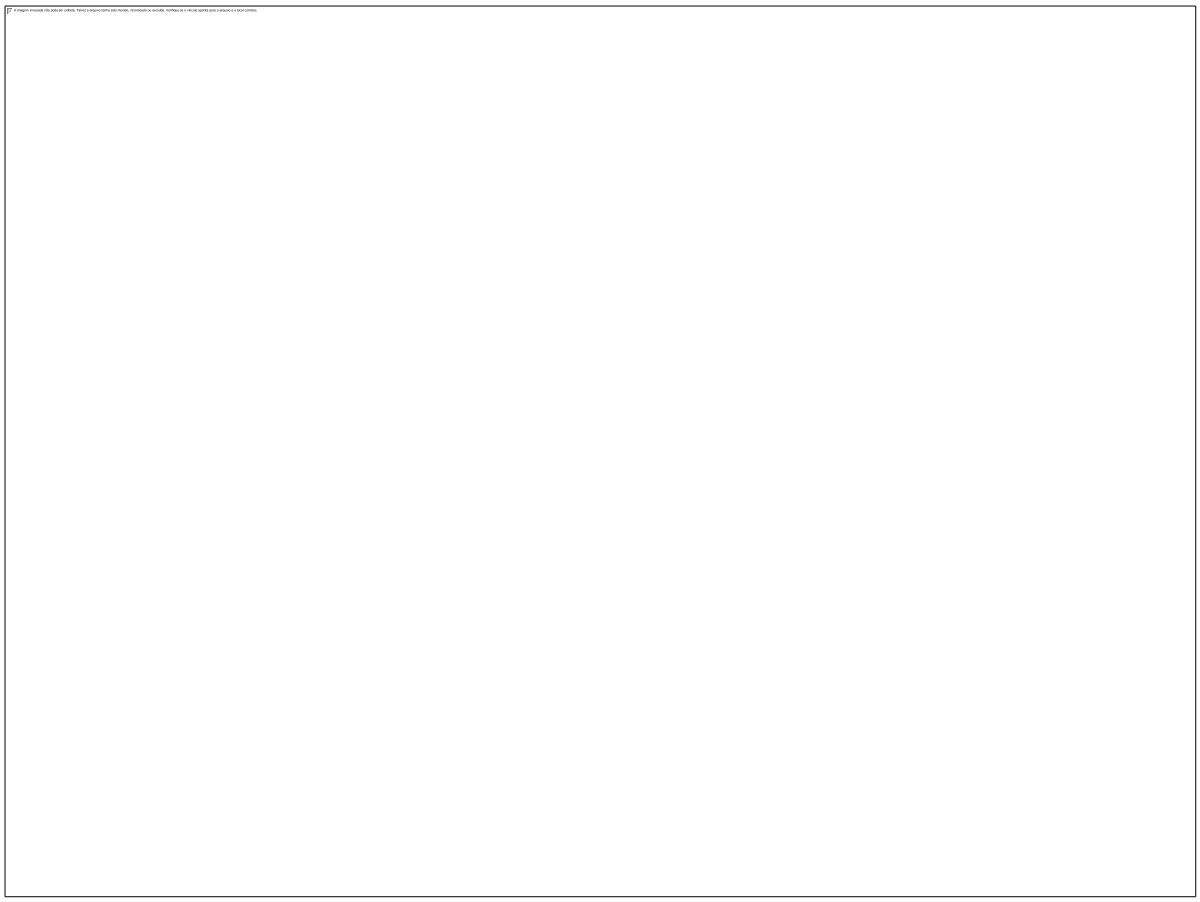


Figura 4 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras com calcinação (CC) (500×)(500×), sem calcinação (SC)(500×)(1000×).

CÓDIGO: ET0428

AUTOR: YASMIM ILIADA CURY RODRIGUES

COAUTOR: DEBORA INGRID DA SILVA GONCALVES

COAUTOR: GUILHERME AVELINO DE LIMA MENDES

COAUTOR: DAVIDSON NUNES DE OLIVEIRA

COAUTOR: VICTOR DANIEL BEVENUTO DE MEDEIROS

ORIENTADOR: FILIPE MARTEL DE MAGALHAES BORGES

TÍTULO: Perovskitas dissubstituídas como catalisadores para a conversão de CO em CO2;: efeitos da composição e da temperatura de calcinação nas propriedades estruturais e catalíticas

Resumo

A poluição atmosférica associada às emissões veiculares representa um importante desafio ambiental e de saúde pública, especialmente pela emissão de monóxido de carbono (CO), formado na combustão incompleta de combustíveis fósseis. Nesse contexto, os conversores catalíticos promovem a oxidação do CO a dióxido de carbono (CO_2). Entretanto, catalisadores convencionais à base de metais nobres apresentam elevado custo e disponibilidade limitada, incentivando a busca por materiais alternativos. As perovskitas do tipo ABO_3 destacam-se pela flexibilidade estrutural, estabilidade térmica e possibilidade de modificação de suas propriedades por substituição parcial dos cátions. Assim, este trabalho investiga a síntese e caracterização de perovskitas dissubstituídas $La_{1-x}Ca_xCo_{1-x}Mn_xO_3$, com x = 0,05, 0,10 e 0,15, calcinadas a 700 e 900 °C. A substituição de La^{3+} por Ca^{2+} e de Co^{3+} por Mn^{3+} foi empregada para promover alterações estruturais e favorecer a formação de vacâncias de oxigênio. As composições e temperaturas de calcinação serão comparadas quanto às propriedades estruturais, morfológicas e catalíticas, buscando relacionar composição, tratamento térmico e desempenho na conversão de CO em CO_2. Espera-se identificar condições que favoreçam a atividade catalítica e a estabilidade dos materiais, contribuindo para o desenvolvimento de catalisadores alternativos com potencial aplicação no controle das emissões atmosféricas.

Palavras-chave: Oxidação. Vacâncias de oxigênio. Redox. Emissões atmosféricas.

TITLE: Double-Substituted Perovskites as Catalysts for CO-to-CO_2 Conversion: Effects of Composition and Calcination Temperature on Structural and Catalytic Properties

Abstract

Air pollution associated with vehicular emissions represents an important environmental and public health challenge, particularly due to the emission of carbon monoxide (CO), formed by the incomplete combustion of fossil fuels. In this context, catalytic converters promote the oxidation of CO to carbon dioxide (CO_2). However, conventional catalysts based on noble metals have high cost and limited availability, encouraging the search for alternative materials. Perovskites with the ABO_3 structure stand out due to their structural flexibility, thermal stability, and ability to modify their properties through partial cation substitution. Thus, this work investigates the synthesis and characterization of double-substituted perovskites $La_{1-x}Ca_xCo_{1-x}Mn_xO_3$, with x = 0.05, 0.10, and 0.15, calcined at 700 and 900 °C. The substitution of La^{3+} by Ca^{2+} and Co^{3+} by Mn^{3+} was employed to promote structural changes and favor the formation of oxygen vacancies. The compositions and calcination temperatures will be compared regarding their structural, morphological, and catalytic properties, aiming to establish relationships between composition, thermal treatment, and performance in CO-to-CO_2 conversion. It is expected to identify conditions that favor catalytic activity and material stability, contributing to the development of alternative catalysts with potential application in the control of atmospheric emissions.

Keywords: Oxidation. Oxygen vacancies. Redox. Atmospheric emissions.

Introdução

A preocupação com a poluição atmosférica e as mudanças climáticas têm impulsionado a busca por soluções capazes de reduzir impactos ambientais. Entre as principais fontes de poluição está a queima incompleta de combustíveis fósseis em veículos automotores. Quando a combustão ocorre de forma incompleta, parte do carbono não é totalmente oxidada a dióxido de carbono (CO_2), resultando na formação de monóxido de carbono (CO). Incolor e altamente tóxico, o CO pode comprometer o transporte de oxigênio pelo sangue, representando riscos à saúde humana e contribuindo para a degradação da qualidade do ar (Salthammer, 2024).

Diante desse cenário, o controle das emissões veiculares torna-se fundamental. Os conversores catalíticos promovem reações capazes de transformar gases nocivos em espécies menos prejudiciais, destacando-se a oxidação do CO a CO_2. Entretanto, os catalisadores convencionais são constituídos, em sua maioria, por metais nobres, como platina, paládio e ródio, que apresentam elevada eficiência, mas alto custo e disponibilidade limitada. Assim, a busca por materiais alternativos que combinem

atividade catalítica, estabilidade térmica e menor custo constitui uma importante área de investigação (Jain et al., 2024).

Entre esses materiais, destacam-se as perovskitas do tipo ABO_3, devido à sua flexibilidade estrutural, estabilidade térmica e propriedades catalíticas. Sua estrutura permite a substituição parcial dos cátions nos sítios A e B, possibilitando modificações nas propriedades eletrônicas, estruturais e catalíticas sem comprometer significativamente a estabilidade da rede (Zeng et al., 2020). Essa versatilidade favorece a formação de vacâncias de oxigênio e alterações nos estados de oxidação, características importantes para reações de oxidação.

O crescente interesse por esses materiais pode ser observado na análise bibliométrica apresentada na Figura 1. Considerando publicações indexadas na base Scopus entre 2016 e 2026, nas áreas de Química, Engenharia e Ciência dos Materiais, foram identificados 20.321 documentos relacionados às perovskitas. A rede de coocorrência evidencia o termo perovskite como núcleo central e a formação de seis clusters temáticos inter-relacionados, demonstrando a abrangência e o caráter interdisciplinar das pesquisas desenvolvidas nesse campo.

A substituição parcial de cátions é utilizada para otimizar atividade catalítica, mobilidade de oxigênio, estabilidade térmica e resistência à desativação. Diferentes teores podem alterar a morfologia, as fases cristalinas e o desempenho catalítico, tornando essencial investigar a relação entre composição, estrutura e eficiência (Xu et al., 2022). Nesse sentido, a substituição simultânea nos sítios A e B apresenta potencial para modificar as propriedades redox e a disponibilidade de oxigênio. A substituição de La^{3+} por Ca^{2+} favorece a formação de vacâncias de oxigênio, enquanto a substituição de Co^{3+} por Mn^{3+} influencia os mecanismos redox e a atividade catalítica, podendo favorecer a conversão de CO em CO_2 (González-Cortés; Imbert, 2013).

Dessa forma, este trabalho investiga perovskitas dissubstituídas $La_{1-x}Ca_xCo_{1-x}Mn_xO_3$, com 5, 10 e 15 mol% de substituição, correspondentes às formulações $La_{0,95}Ca_{0,05}Co_{0,95}Mn_{0,05}O_3$, $La_{0,90}Ca_{0,10}Co_{0,90}Mn_{0,10}O_3$ e $La_{0,85}Ca_{0,15}Co_{0,85}Mn_{0,15}O_3$, calcinadas a 700 e 900 °C por 4h. O objetivo é avaliar a influência da composição e da temperatura de calcinação nas propriedades estruturais, morfológicas e catalíticas, buscando compreender seus efeitos sobre a formação de fases, estabilidade estrutural e conversão de CO em CO_2. Estudos recentes demonstram que modificações composicionais em perovskitas contendo Co e Mn alteram propriedades eletrônicas, dinâmica do oxigênio e desempenho na oxidação de CO (Ercan et al., 2025). Assim, busca-se contribuir para o desenvolvimento de catalisadores eficientes, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis.

Metodologia

2.1 Síntese das perovskitas

Foram sintetizados catalisadores com estrutura perovskita do tipo $La_{1-x}Ca_xCo_{1-x}Mn_xO_3$, com graus de substituição x = 0,05, 0,10 e 0,15, empregando o método de combustão com uréia rica como combustível. As composições nominais foram $La_{0,95}Ca_{0,05}Co_{0,95}Mn_{0,05}O_3$, $La_{0,90}Ca_{0,10}Co_{0,90}Mn_{0,10}O_3$ e $La_{0,85}Ca_{0,15}Co_{0,85}Mn_{0,15}O_3$. Os reagentes, suas purezas e fabricantes são apresentados na Tabela 1.

Os cálculos estequiométricos foram realizados com base na teoria dos propelentes químicos, considerando as valências oxidantes dos nitratos metálicos e a capacidade redutora da ureia (DONG et al., 2022). A partir desse balanço, foram determinadas as quantidades de reagentes necessárias para estabelecer uma relação adequada entre combustível e agentes oxidantes, visando favorecer a combustão e a formação do óxido desejado. Para cada composição, foram calculadas massas para obtenção de aproximadamente 5 g de material.

A síntese compreendeu cálculo estequiométrico, pesagem, preparação da solução precursora, combustão e tratamento térmico, conforme apresentado na Figura 2. Os sais precursores foram pesados individualmente em balança analítica. Aproximadamente 150 mL de água destilada foram aquecidos entre 80 e 90 °C e utilizados para a dissolução dos precursores. Após a completa dissolução, adicionou-se uréia na proporção rica, mantendo-se a solução sob agitação magnética até a obtenção de uma mistura homogênea, favorecendo a distribuição dos cátions e do combustível (DONG et al., 2022).

A solução foi transferida para um recipiente de alumínio e aquecida sobre uma resistência elétrica. Inicialmente, ocorreu a evaporação da água, seguida pelo aumento da concentração e viscosidade da solução. Com a continuidade do aquecimento, observou-se intensa liberação de gases e formação de fumaça, seguida da ignição espontânea da mistura. A reação apresentou chama amarelada e curta duração, resultando em material sólido poroso associado à intensa liberação de gases durante a combustão (LI et al., 2021). Após o resfriamento, os pós foram macerados manualmente em grau e pistilo de porcelana para desagregar os aglomerados.

Os pós foram posteriormente submetidos à calcinação em forno mufla a 700 e 900 °C, durante 4 h, com taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1}. O tratamento térmico teve como objetivo favorecer a cristalização da estrutura perovskita, promover a organização da fase cristalina e eliminar possíveis resíduos orgânicos ou espécies remanescentes da combustão (NOVITSKAYA et al., 2021).

Após a calcinação, adotou-se a sigla LCCM, referente aos elementos La, Ca, Co e Mn, seguida do percentual de substituição e da temperatura de calcinação. As amostras foram denominadas LCCM05-700, LCCM05-900, LCCM10-700, LCCM10-900, LCCM15-700 e LCCM15-900, correspondendo às composições x = 0,05, 0,10 e 0,15 mol% submetidas aos tratamentos de 700 e 900 °C durante 4 h.

2.2 Fluorescência de Raios X (FRX)

A composição química dos catalisadores foi determinada por Fluorescência de Raios X (FRX), utilizando espectrômetro EDX-720, da Shimadzu. As análises foram realizadas após a calcinação, sem dissolução ou preparação química prévia. A técnica foi empregada para determinar qualitativa e quantitativamente os elementos presentes,

permitindo avaliar a composição obtida e verificar os principais constituintes das perovskitas. Os resultados também foram utilizados para comparar as composições nominais e experimentais e avaliar possíveis variações decorrentes da síntese e do tratamento térmico (VANHOOF et al., 2022).

2.3 Difração de Raios X (DRX)

A caracterização estrutural foi realizada por Difração de Raios X (DRX), utilizando difratômetro XRD-6000, da Shimadzu, com radiação CuKα e comprimento de onda λ = 1,5406 Å. Os difratogramas foram obtidos entre 10° e 80° em 2θ, com velocidade de varredura de 1° min^{-1}. Os padrões foram utilizados para identificar as fases cristalinas e avaliar a formação da estrutura perovskita após os tratamentos térmicos. Foram consideradas as posições, intensidades relativas e o alargamento dos principais picos, permitindo comparar o comportamento cristalino em função da composição e da temperatura. A comparação entre as amostras tratadas a 700 e 900 °C permitiu avaliar a influência do tratamento térmico sobre a organização estrutural e a formação das fases cristalinas (WANG et al., 2023).

2.4 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As análises de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foram realizadas no espectrômetro IRTracer-100, da Shimadzu. Os espectros foram utilizados para identificar bandas de absorção associadas às espécies presentes nos catalisadores, incluindo vibrações das ligações metal–oxigênio relacionadas à estrutura perovskita e possíveis espécies residuais, como carbonatos, nitratos e compostos adsorvidos na superfície das partículas (SILVA et al., 2023). Os resultados foram analisados de forma complementar aos dados de DRX, contribuindo para a avaliação da formação da estrutura desejada e de possíveis alterações químicas após os tratamentos térmicos.

2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-EDS)

A caracterização morfológica foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-EDS), utilizando microscópio eletrônico TM3000, da Hitachi. As micrografias foram obtidas com ampliações de 500× a 5000×, permitindo avaliar a morfologia superficial dos materiais. As imagens foram analisadas quanto à morfologia das partículas, formação de aglomerados, distribuição relativa e presença de regiões porosas. Essas características são relevantes devido à natureza do método de combustão, no qual a rápida liberação de gases pode influenciar a morfologia e a porosidade dos pós obtidos (SIDDIQUE et al., 2022). A análise também permitiu comparar os efeitos da composição e das temperaturas de calcinação sobre as características microestruturais, relacionando os resultados de MEV aos dados de DRX e FTIR.

Resultados e Discussões

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos para as perovskitas do sistema $La_{1-x}Ca_xCo_{1-x}Mn_xO_3$, considerando os graus de substituição catiônica x = 0,05, 0,10 e 0,15 mol% e as temperaturas de calcinação de 700 e 900 °C por 4h. A análise foi conduzida de forma integrada, buscando compreender a influência da composição e do tratamento térmico sobre as características dos materiais e relacioná-las ao desempenho catalítico. Para isso, foram empregadas as técnicas de Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), nessa ordem.

3.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

A composição elementar das amostras foi avaliada por Fluorescência de Raios X (FRX), visando verificar a presença dos principais elementos do sistema $La_{1-x}Ca_xCo_{1-x}Mn_xO_3$ e possíveis variações associadas ao grau de substituição e à temperatura de calcinação. Os resultados quantitativos das seis amostras são apresentados na Tabela 2.

Os resultados demonstraram a predominância de La e Co em todas as amostras, em concordância com a composição esperada para a matriz baseada em $LaCoO_3$ (COUTO et al., 2020). Ca e Mn também foram identificados em todas as amostras, apresentando, de modo geral, aumento dos teores relativos com o incremento de x. Nas amostras calcinadas a 700 °C, o Ca aumentou de 0,703% em LCCM05-700 para 1,674% em LCCM10-700 e 2,212% em LCCM15-700, enquanto o Mn passou de 0,795 para 0,924 e 1,398%, respectivamente. Para 900 °C, os teores de Ca foram 0,583, 1,419 e 2,328%, e os de Mn corresponderam a 0,848, 0,934 e 1,545% para x = 0,05, 0,10 e 0,15, respectivamente.

Esse comportamento está de acordo com a composição nominal do sistema, uma vez que o aumento de x implica maior quantidade de Ca e Mn. A detecção desses elementos por FRX confirma sua presença nas amostras, mas a técnica isoladamente não permite confirmar a formação da fase perovskita nem determinar a ocupação dos sítios cristalográficos pelos cátions (KUZNETSOVA et al., 2021). Essa avaliação requer técnicas estruturais, como a DRX, que permite identificar as fases cristalinas e possíveis alterações decorrentes da composição.

Em relação à temperatura, observou-se redução dos teores relativos de La para todas as composições quando a calcinação passou de 700 para 900 °C. Para LCCM05, LCCM10 e LCCM15, os valores passaram de 63,774 para 59,553%, de 67,794 para 63,533% e de 59,670 para 56,487%, respectivamente. O Co também apresentou redução, embora em menor magnitude para LCCM15. Essas variações devem ser interpretadas considerando o caráter relativo da quantificação por FRX, pois alterações na proporção dos demais elementos influenciam diretamente os percentuais dos constituintes majoritários devido aos efeitos de matriz envolvidos na análise quantitativa (AIDENE et al., 2021).

Para os elementos substituintes, o efeito da temperatura não apresentou comportamento uniforme. Em LCCM05 e LCCM10, o Ca diminuiu com o aumento da temperatura, enquanto em LCCM15 ocorreu pequena elevação. Para o Mn, observou-se aumento em LCCM05, pequena variação em LCCM10 e aumento mais evidente em LCCM15. Assim, as alterações na composição relativa também dependem do grau de substituição empregado.

Além dos elementos previstos, foram identificados Na, K, S, Cr, Pr e Al em algumas amostras. Considerando o caráter multiusuário do laboratório, esses elementos podem estar relacionados a possíveis contaminações provenientes de outros materiais, reagentes, superfícies ou etapas de preparação e análise. Destaca-se a presença de Pr em LCCM05-900, com teor relativo de 12,515%, embora esse elemento não faça parte da composição proposta. Esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois a proximidade das energias de ionização do Pr e do La pode favorecer a sobreposição de linhas características na análise por fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF). Da mesma forma, os teores de Cr determinados para LCCM10 e LCCM15 podem estar associados à proximidade das energias de ionização do Cr e Mn, favorecendo a sobreposição de suas linhas características e dificultando a quantificação individual por EDXRF (WANG et al., 2022).

De maneira geral, os resultados de FRX indicaram a presença dos principais elementos previstos e evidenciaram o aumento dos teores relativos de Ca e Mn com o incremento de x. As variações entre as temperaturas não apresentaram comportamento uniforme, constituindo uma avaliação inicial da composição elementar e fornecendo subsídios para a interpretação estrutural por DRX.

3.2 Difração de Raios X (DRX)

A análise dos difratogramas apresentados nas Figuras 3, 4 e 5 evidencia a formação de uma estrutura cristalina do tipo perovskita para as diferentes composições e condições de tratamento térmico. De maneira geral, os padrões apresentam reflexões em regiões semelhantes de 2θ, destacando-se sinais próximos a 23°, 33°, 40–41°, 47–48°, 59–60°, 69–70° e 78–80°. A manutenção dessas reflexões com a variação de x indica que o aumento de 0,05 para 0,15 não promoveu alteração estrutural significativa, mantendo-se o padrão associado à fase $LaCoO_3$, conforme a ficha cristalográfica ICDD (International Centre for Diffraction Data) nº 00-048-0123 (KUMAR et al., 2021).

Para x = 0,05, observa-se diferença entre as amostras tratadas a 700 e 900 °C. Embora ambas apresentem as mesmas principais reflexões, LCCM05-900 possui picos mais estreitos e bem definidos que LCCM05-700, especialmente próximos a 33°, 47–48° e 59–60°. Esse comportamento indica maior desenvolvimento da cristalinidade após o tratamento a 900 °C, associado à maior mobilidade atômica e ao favorecimento da difusão e reorganização da estrutura cristalina (CUI et al., 2024).

Para x = 0,10, as amostras LCCM10-700 e LCCM10-900 mantêm o mesmo conjunto de reflexões, sem evidência de transformação para estrutura distinta. Entretanto, os picos da amostra a 900 °C apresentam maior definição, principalmente próximo de 33°, enquanto a amostra a 700 °C apresenta reflexões relativamente mais alargadas. Para x = 0,15, também são observadas reflexões em posições semelhantes. LCCM15-700 apresenta picos bem definidos, com destaque para a reflexão próxima de 33°, enquanto LCCM15-900 apresenta reflexões mais estreitas e definidas nas principais regiões. Assim, o aumento da temperatura favorece o desenvolvimento cristalino sem alteração evidente da fase predominante.

A comparação entre as três composições evidencia que a temperatura de calcinação exerce influência mais perceptível sobre os difratogramas do que a variação de x. Para x = 0,05, 0,10 e 0,15, o tratamento a 900 °C resulta, de maneira geral, em reflexões mais

definidas que o tratamento a 700 °C. Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento da mobilidade dos constituintes, favorecendo a difusão atômica, a reorganização da rede e o crescimento dos domínios cristalinos (PARK et al., 2023).

Por outro lado, o aumento de x não promoveu o surgimento de novo conjunto de reflexões. As posições dos principais picos permanecem próximas, indicando preservação da estrutura cristalina principal. As pequenas diferenças nas intensidades relativas e na definição das reflexões podem estar associadas à introdução de Ca^{2+} no sítio A e Mn^{3+} no sítio B, alterando o ambiente químico e o equilíbrio de cargas da rede (MAQSOOD et al., 2024).

Não se observa, nos difratogramas, o surgimento de reflexões adicionais de elevada intensidade claramente atribuíveis a fases cristalinas secundárias, não sendo identificados sinais intensos característicos de La_2O_3 ou Co_3O_4. Dessa forma, os resultados indicam predominância da estrutura perovskita nas condições avaliadas. Entretanto, a ausência de reflexões secundárias intensas não permite afirmar isoladamente a completa ausência de fases minoritárias ou pouco cristalinas, sendo necessária uma análise mais aprofundada para confirmação definitiva da pureza de fase, como o refinamento via Rietveld.

A substituição de Ca e Mn pode promover modificações locais mesmo sem alterações expressivas no padrão de difração. Ca^{2+} modifica o equilíbrio de cargas no sítio A, enquanto Mn^{3+} no sítio B pode alterar as ligações metal–oxigênio e favorecer distorções locais e alterações na concentração de defeitos estruturais. Essas modificações são relevantes para as propriedades catalíticas, uma vez que defeitos associados à rede de oxigênio podem influenciar a mobilidade e a disponibilidade de espécies de oxigênio em processos redox (SAHADEVAN et al., 2022).

Assim, os resultados de DRX indicam preservação da estrutura cristalina principal nas diferentes composições, enquanto a temperatura de calcinação apresenta efeito mais evidente sobre o desenvolvimento cristalino. O tratamento a 900 °C favorece reflexões mais estreitas e definidas, enquanto a variação de x = 0,05 para x = 0,15 não provoca alterações estruturais macroscópicas no padrão de difração.

3.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR apresentados nas Figuras 6, 7 e 8 apresentam comportamento semelhante para as diferentes composições, com absorção mais pronunciada em baixas frequências, principalmente entre aproximadamente 500 e 700 cm^{-1}. Essa região é característica das vibrações envolvendo ligações metal–oxigênio presentes em óxidos do tipo perovskita, estando associada principalmente aos modos vibracionais das ligações Co–O e Mn–O nos octaedros [BO_6] (CHEN et al., 2021). A presença dessa contribuição em todas as composições está de acordo com a formação da rede de óxidos metálicos observada por DRX.

Para x = 0,05, os espectros das amostras a 700 e 900 °C apresentam o mesmo comportamento geral na região de baixa frequência, sem deslocamentos expressivos que indiquem modificação significativa dos principais modos vibracionais. A diferença entre os tratamentos está principalmente no formato da banda, com pequenas alterações após o aumento da temperatura. Essas modificações podem estar relacionadas ao maior

ordenamento estrutural promovido pelo tratamento térmico, embora não sejam suficientes, isoladamente, para indicar mudança de fase (ABD ALLAH et al., 2022).

Comportamento semelhante é observado para x = 0,10 e x = 0,15. A região entre aproximadamente 500 e 700 cm^{-1} permanece como principal contribuição, independentemente da temperatura. A manutenção dessa região com o aumento de x indica a preservação dos principais modos vibracionais associados à rede metal–oxigênio. Assim, a substituição de Ca e Mn nas concentrações estudadas não promoveu alterações suficientemente expressivas para resultar no surgimento de novas bandas predominantes (NADIG et al., 2024).

A comparação entre as composições também não evidencia tendência sistemática de deslocamento da principal banda de baixa frequência com o aumento de x. Pequenas diferenças no formato e na posição aparente das contribuições podem estar relacionadas às modificações no ambiente químico dos cátions e às alterações locais nas ligações metal–oxigênio decorrentes da substituição. Comportamento semelhante foi observado em perovskitas submetidas à substituição parcial de cátions, nas quais a incorporação de Mn não promoveu deslocamentos significativos das principais bandas vibracionais identificadas por FTIR (DHAHRI et al., 2022). Entretanto, como essas mudanças são discretas, não é possível atribuir, apenas pelos espectros, alteração estrutural significativa da fase cristalina.

Nas regiões entre aproximadamente 1200 e 1700 cm^{-1} são observadas contribuições de menor intensidade e mais largas, que podem estar relacionadas a espécies superficiais ou residuais provenientes da síntese (MELO et al., 2008). Essas bandas são mais perceptíveis nas amostras tratadas a 700 °C, enquanto em algumas amostras a 900 °C apresentam-se menos pronunciadas, indicando que o aumento da temperatura pode ter favorecido a decomposição ou remoção de espécies residuais.

Também são observadas contribuições largas entre aproximadamente 3000 e 3700 cm^{-1}, especialmente próximas a 3400 cm^{-1}, normalmente atribuídas às vibrações de estiramento O–H e relacionadas à presença de grupos hidroxila ou água adsorvida na superfície das partículas (LINARES et al., 2018). Por ser uma contribuição ampla e pouco definida, sua presença deve ser interpretada principalmente como característica superficial, e não como evidência de alteração da estrutura perovskita.

Quando comparados os tratamentos térmicos, não há surgimento ou desaparecimento de bandas principais entre 700 e 900 °C. A principal contribuição associada às ligações metal–oxigênio permanece presente em ambas as temperaturas para todas as composições, enquanto as diferenças nas regiões intermediárias são mais discretas. O aumento da temperatura, portanto, não promove alterações significativas nos principais modos vibracionais identificados por FTIR, embora possa favorecer modificações no grau de organização e nas características locais da estrutura. Comportamento semelhante foi observado em perovskitas contendo Mn e Co submetidas a diferentes temperaturas de calcinação, nas quais o aumento da temperatura promoveu o estreitamento da banda de estiramento Mn–O próxima a 600 cm^{-1}, em concordância com o aumento da cristalinidade observado por DRX (MOHAMED et al., 2025).

A comparação com os resultados de DRX evidencia o caráter complementar das técnicas. Enquanto o DRX demonstra diferenças mais claras entre as temperaturas,

principalmente na definição das reflexões cristalinas, o FTIR demonstra a manutenção dos principais modos vibracionais associados à rede metal–oxigênio. Assim, o DRX indica o desenvolvimento da ordem cristalina com o tratamento térmico, enquanto o FTIR confirma a preservação das ligações químicas características da estrutura de óxido do tipo perovskita.

De modo geral, os espectros de FTIR demonstram que a variação de x = 0,05 a x = 0,15 não promoveu alterações significativas nos principais modos vibracionais. A temperatura de calcinação também não provocou mudanças substanciais nas bandas características, embora tenha influenciado algumas contribuições secundárias nas regiões intermediária e de alta frequência. A predominância da banda associada às vibrações metal–oxigênio reforça a manutenção da rede de óxidos formada durante a síntese e está em concordância com a estrutura cristalina identificada por DRX.

3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias apresentadas nas Figuras 9 e 10 permitem observar a morfologia das amostras e as alterações associadas à composição e à temperatura de calcinação. De maneira geral, todas apresentam morfologia heterogênea, caracterizada pela formação de aglomerados de partículas com superfícies irregulares e rugosas, além de regiões porosas e diferentes níveis de compactação. Esse comportamento indica que o processo de síntese e tratamento térmico resultou em estruturas com significativa heterogeneidade morfológica.

Para x = 0,05, LCCM05-900 apresenta aglomerados relativamente compactos, superfície irregular e regiões de menor definição entre as partículas. LCCM05-700 apresenta estrutura mais aberta, com maior evidência de regiões granulares e porosas. Essa diferença sugere que o aumento da temperatura favoreceu processos de difusão, aproximação e reorganização das partículas, contribuindo para a formação de aglomerados mais compactos. O comportamento é compatível com os resultados de DRX, nos quais o tratamento a 900 °C apresentou reflexões mais definidas, indicando maior desenvolvimento da estrutura cristalina. Tendências semelhantes são relatadas para perovskitas obtidas por combustão em solução, nas quais o aumento da temperatura promove alterações microestruturais, crescimento dos grãos e redução da porosidade, acompanhadas por mudanças na cristalinidade (MOLDOVAN et al., 2022).

Nas amostras com x = 0,10, também são observados aglomerados irregulares. LCCM10-900 apresenta aglomerados mais definidos e superfície relativamente compacta, enquanto LCCM10-700 apresenta morfologia mais granular, com regiões de maior rugosidade e espaços entre partículas. Essa diferença pode estar associada ao tratamento térmico, uma vez que temperaturas mais elevadas aumentam a mobilidade dos constituintes e favorecem processos de coalescência e reorganização.

Para x = 0,15, LCCM15-900 apresenta superfície bastante irregular e rugosa, com regiões de aglomeração evidentes e estruturas de aspecto poroso. LCCM15-700 apresenta aglomerados mais abertos e heterogêneos, com partículas e regiões superficiais mais distinguíveis. Apesar dessas diferenças, ambas apresentam elevada tendência à aglomeração, indicando que esse comportamento é comum ao sistema estudado.

A comparação entre as composições mostra que a variação de x = 0,05 para x = 0,15 não produz mudança morfológica completamente definida ou linear. As três composições apresentam estruturas aglomeradas e superfícies irregulares em ambas as temperaturas, com diferenças locais de rugosidade, compactação e distribuição dos aglomerados. Assim, não é possível estabelecer, apenas pelas micrografias, relação direta entre o aumento do teor de substituição e o tamanho ou a morfologia das partículas.

Por outro lado, o efeito da temperatura é mais perceptível. De modo geral, as amostras tratadas a 700 °C apresentam estruturas mais abertas e granulares, enquanto as tratadas a 900 °C apresentam regiões de aglomeração mais compactas e superfícies com maior grau de coalescência. Esse comportamento pode estar relacionado à maior energia térmica fornecida durante a calcinação, favorecendo a difusão superficial, a aproximação entre partículas e a formação de regiões mais agregadas, além do crescimento dos domínios cristalinos observado por DRX.

Entretanto, a presença de aglomerados maiores nas micrografias não deve ser interpretada diretamente como aumento do tamanho dos cristalitos. O tamanho dos cristalitos está relacionado aos domínios coerentemente difratantes e pode ser determinado a partir dos dados de DRX, enquanto a MEV permite avaliar principalmente morfologia, aglomeração e características superficiais. Assim, as duas técnicas fornecem informações complementares.

Outro aspecto relevante é a presença de superfícies rugosas e regiões com aspecto poroso. Essas características podem favorecer a exposição de maior quantidade de superfície do material, aspecto importante para aplicações catalíticas. Entretanto, a área superficial não pode ser determinada apenas por MEV, sendo necessária técnica específica, como adsorção de N_2 pelo método BET, para determinar a área superficial e a distribuição de poros.

A morfologia observada também apresenta coerência com os resultados de FTIR. A manutenção das principais bandas associadas às ligações metal–oxigênio indica preservação da composição química estrutural fundamental, enquanto as alterações observadas por MEV estão relacionadas principalmente à organização física das partículas e ao efeito do tratamento térmico. Dessa forma, MEV, FTIR e DRX podem ser interpretados conjuntamente: o DRX evidencia o desenvolvimento da ordem cristalina, o FTIR confirma a manutenção dos principais modos vibracionais da rede metal–oxigênio e a MEV permite visualizar as alterações morfológicas decorrentes do tratamento térmico.

Em conjunto, as micrografias demonstram morfologia heterogênea, com aglomeração de partículas, superfícies irregulares e regiões de caráter poroso. A temperatura de calcinação exerce influência mais evidente sobre a compactação e organização dos aglomerados, com tendência a estruturas mais agregadas a 900 °C, enquanto a variação de x = 0,05 para x = 0,15 não apresenta tendência morfológica linear. Esses resultados reforçam que o aumento da temperatura favorece não apenas o desenvolvimento da cristalinidade observado por DRX, mas também modificações na organização morfológica das partículas (MELO et al., 2008).

Conclusão

Os resultados permitiram avaliar a influência do grau de substituição e da temperatura de calcinação nas perovskitas dissubstituídas $La_{1-x}Ca_xCo_{1-x}Mn_xO_3$, com x = 0,05, 0,10 e 0,15, calcinadas a 700 e 900 °C. A análise integrada por FRX, DRX, FTIR e MEV possibilitou relacionar as características químicas, estruturais e morfológicas dos materiais sintetizados pelo método de combustão.

Os resultados de FRX confirmaram a presença dos principais elementos previstos, destacando-se La, Co, Ca e Mn. O aumento de x apresentou, de modo geral, aumento nos teores relativos de Ca e Mn, conforme as formulações nominais. As diferenças entre as temperaturas de calcinação não apresentaram comportamento uniforme, devendo ser consideradas as características relativas da quantificação por FRX. Elementos não previstos também foram identificados em algumas amostras, sendo associados à possibilidade de interferências analíticas e contaminações decorrentes do uso de laboratório multiusuário.

A análise por DRX indicou a predominância da estrutura perovskita nas diferentes composições, sem alterações significativas associadas ao aumento da substituição. Não foram observadas reflexões secundárias intensas atribuíveis a La_2O_3 ou Co_3O_4, embora a presença de fases minoritárias ou pouco cristalinas não possa ser completamente descartada. O efeito da temperatura foi mais evidente, com reflexões mais estreitas e definidas a 900 °C, indicando maior desenvolvimento da cristalinidade.

Os espectros de FTIR apresentaram, em todas as amostras, bandas na região de aproximadamente 500–700 cm^{-1}, associadas às vibrações metal–oxigênio. A manutenção dessas bandas indica a preservação das principais características da rede de óxidos. As micrografias de MEV revelaram morfologia heterogênea, com aglomerados, superfícies irregulares e regiões de aspecto poroso. As amostras calcinadas a 900 °C apresentaram, de modo geral, maior compactação e aderência dos aglomerados, enquanto a variação da composição não apresentou tendência morfológica linear.

Em conjunto, os resultados demonstram que a temperatura de calcinação exerceu influência mais evidente sobre a organização estrutural e morfológica dos materiais do que o grau de substituição. A preservação da estrutura perovskita e as alterações de cristalinidade indicam materiais promissores para investigação como catalisadores alternativos na conversão de CO em CO_2. Como continuidade, serão realizadas análises de adsorção/dessorção de N_2 pelos métodos BET e BJH, além do refinamento de Rietveld, visando determinar a área superficial, características dos poros e parâmetros estruturais, permitindo correlacionar as propriedades físico-estruturais com o potencial catalítico dos materiais.

Referências

ABD ALLAH, T. M.; ELFALAKY, A.; GHOZZA, M. H. Effect of sintering on formation, structure, magnetic and dielectric properties of nanocrystalline $La_{0.1}Ca_{0.9}MnO_3$ perovskite. Materials Science and Engineering B, v. 281, 115749, 2022. DOI: 10.1016/j.mseb.2022.115749.

AIDENE, S.; KHAYDUKOVA, M.; PASHKOVA, G.; et al. Does chemometrics work for matrix effects correction in X-ray fluorescence analysis? Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, v. 185, 106310, 2021. DOI: 10.1016/j.sab.2021.106310.

AIDENE, S.; KHAYDUKOVA, M.; PASHKOVA, G.; et al. Does chemometrics work for matrix effects correction in X-ray fluorescence analysis? Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, v. 185, 106310, 2021. DOI: 10.1016/j.sab.2021.106310.

CHEN, J.; GUO, T.; DING, W.; et al. Effect of CuO on the thermal kinetics and combustion properties of Al/MoO_3 thermite prepared by ball milling. Ceramics International, v. 47, p. 16500–16510, 2021.

COUTO, J. E. N. 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) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.

CUI, Y. et al. Key roles of initial calcination temperature in accelerating the performance in proton ceramic fuel cells via regulating 3D microstructure and electronic structure. Small Structures, 2024. DOI: 10.1002/sstr.202300439.

DHAHRI, A.; BENALI, A.; ABDELMOULA, N.; et al. Mössbauer, magnetic and optical studies of Mn substitution in Fe site of $La_{0.67}Ca_{0.2}Ba_{0.13}FeO_3$ nanomaterials. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 562, 169856, 2022. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169856.

DONG, H. et al. Solution combustion synthesis: the relevant metrics for producing advanced and nanostructured photocatalysts. Nanoscale, v. 14, 2022. DOI: 10.1039/D2NR02714C.

ELSEVIER. Scopus: database of peer-reviewed literature. Amsterdam: Elsevier, 2026. Disponível em:Scopus.

ERCAN, K. E.; KARATOK, M.; SAY, Z.; et al. Cooperative catalytic role of Co and Mn sites on $LaCo_xMn_{1-x}O_3$ perovskite nanoparticles in CO and NO oxidation. ACS Applied Nano Materials, v. 8, n. 34, p. 16779–16791, 2025. DOI: 10.1021/acsanm.5c02876.

GONZÁLEZ-CORTÉS, S. L.; IMBERT, F. E. Fundamentals, properties and applications of solid catalysts prepared by solution combustion synthesis. Applied Catalysis A: General, v. 452, p. 117–131, 2013. DOI: 10.1016/j.apcata.2012.11.024.

JAIN, A.; TAMHANKAR, S.; JAISWAL, Y. Role of La-based perovskite catalysts in environmental pollution remediation. Reviews in Chemical Engineering, v. 40, n. 2, p. 193–228, 2024. DOI: 10.1515/revce-2022-0034.

KUMAR, A.; SIVAPRAHASAM, D.; THAKUR, A. D. Improved thermoelectric properties in (1-x)$LaCoO_3$/(x)$La_{0.7}Sr_{0.3}CoO_3$ composite. Materials Chemistry and Physics, v. 269, 124750, 2021. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2021.124750.

KUZNETSOVA, T. V. et al. Structural insight into $La_{0.5}Ca_{0.5}Mn_{0.5}Co_{0.5}O_3$ decomposition in the methane combustion process. Nanomaterials, v. 11, n. 9, 2283, 2021. DOI: 10.3390/nano11092283.

LI, H.; YU, J.; GONG, Y.; et al. Perovskite catalysts with different dimensionalities for environmental and energy applications: a review. Separation and Purification Technology, v. 307, 122716, 2023. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122716.

LI, et al. Solution combustion synthesis of hierarchical porous $LiFePO_4$ powders as cathode materials for lithium-ion batteries. Advanced Powder Technology, v. 32, n. 6, p. 1935–1942, 2021. DOI: 10.1016/j.apt.2021.04.007.

LINARES, C.; CAMPOS, A.; MUJICA, S.; et al. Calcination effect of Ca-Fe hydrocalumites supported CoMo for hydrodesulfurization of thiophene and hydrogenation of cyclohexene. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, v. 41, n. 3, p. 133–139, 2018.

MAQSOOD, M. F. et al. Effect of Mn substitution at B-site on the crystal structure and energy storage performance of $La_{0.75}Sr_{0.25}CoO_3$ perovskite. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 139, p. 587–600, 2024. DOI: 10.1016/j.jiec.2024.05.034.

MELO, D. S.; MARINHO, É. P.; SOLEDADE, L. E. B.; et al. Lanthanum-based perovskites obtained by the polymeric precursor method. Journal of Materials Science, v. 43, n. 2, p. 551–556, 2008. DOI: 10.1007/s10853-007-1714-7.

MOHAMED, [autores]. Temperature induced structural distortion and their effect on the physical properties of $La_{0.6}Sr_{0.4}Mn_{0.8}Co_{0.2}O_3$ nanoparticles. Scientific Reports, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-14101-0.

MOLDOVAN, S. et al. Evaluation of structural and functional properties of $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ perovskite prepared by the fast solution combustion approach. Catalysts, v. 12, n. 12, 1636, 2022. DOI: 10.3390/catalysts12121636.

NADIG, P. R.; MURARI, M. S.; DAIVAJNA, M. D. Influence of heat sintering on the physical properties of bulk $La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$ perovskite manganite. Physical Chemistry Chemical Physics, v. 26, n. 6, p. 5237–5252, 2024. DOI: 10.1039/D3CP04185A.

NOVITSKAYA, E.; KELLY, J. P.; BHADURI, S.; GRAEVE, O. A. A review of solution combustion synthesis: an analysis of parameters controlling powder characteristics. International Materials Reviews, v. 66, n. 3, p. 147–192, 2021. DOI: 10.1080/09506608.2020.1765603.

PARK, J.-W.; SHIN, J.; JU, Y.-W. Influence of calcination temperature on electrochemical properties of perovskite oxide nanofiber catalysts. Energies, v. 16, n. 13, 4979, 2023. DOI: 10.3390/en16134979.

SAHADEVAN, J. et al. Effect of Mn substitution on magnetic behaviour of oxygen defective $LaCoO_3$ perovskite oxide. Materials Science and Engineering B, v. 284, 115875, 2022. DOI: 10.1016/j.mseb.2022.115875.

SALTHAMMER, T. Carbon monoxide as an indicator of indoor air quality. Environmental Science: Atmospheres, v. 4, p. 291–305, 2024. DOI: 10.1039/D4EA00006D.

SIDDIQUE, F.; GONZALEZ-CORTES, S.; MIRZAEI, A.; et al. Solution combustion synthesis: the relevant metrics for producing advanced and nanostructured photocatalysts. Nanoscale, v. 14, p. 11806–11868, 2022. DOI: 10.1039/D2NR02714C.

SILVA, [autores]. Lattice-charge imbalance and redox catalysis over perovskite-type ferrite- and manganite-based mixed oxides as studied by XRD, FTIR, UV–Vis DRS, and XPS. Scientific Reports, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-34065-3.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. VOSviewer: visualizing scientific landscapes. Leiden: CWTS, Leiden University, 2026. Disponível em:VOSviewer.

VANHOOF, C.; BACON, J. R.; FITTSCHEN, U. E. A.; VINCZE, L. Atomic spectrometry update: review of advances in X-ray fluorescence spectrometry and its special applications. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, v. 37, n. 9, p. 1761–1775, 2022. DOI: 10.1039/D2JA90035A.

WANG, X. et al. Evaluation of 20 elements in soils and sediments by ED-XRF of monochromatic excitation. Metals, v. 12, n. 11, 1798, 2022. DOI: 10.3390/met12111798.

WANG, [autores]. Influence of calcination temperature on electrochemical properties of perovskite oxide nanofiber catalysts. Energies, v. 16, n. 13, 4979, 2023. DOI: 10.3390/en16134979.

XU, X.; PAN, Y.; ZHONG, Y.; et al. New undisputed evidence and strategy for enhanced lattice-oxygen participation of perovskite electrocatalyst through cation deficiency manipulation. Advanced Science, v. 9, n. 14, e2200530, 2022. DOI: 10.1002/advs.202200530.

ZENG, Z.; XU, Y.; ZHANG, Z.; et al. Rare-earth-containing perovskite nanomaterials: design, synthesis, properties and applications. Chemical Society Reviews, v. 49, p. 1109–1143, 2020. DOI: 10.1039/C9CS00330D.

Anexos



Figura 1 – Rede bibliométrica de ocorrência de palavras-chave relacionada às pesquisas sobre perovskitas, obtida na base Scopus (2016–2026), evidenciando a formação de seis clusters temáticos. Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da Scopus, proce



Tabela 1 – Reagentes utilizados na síntese dos catalisadores, respectivas purezas, fórmula química e fabricantes. Fonte: Elaborado pelo autor.

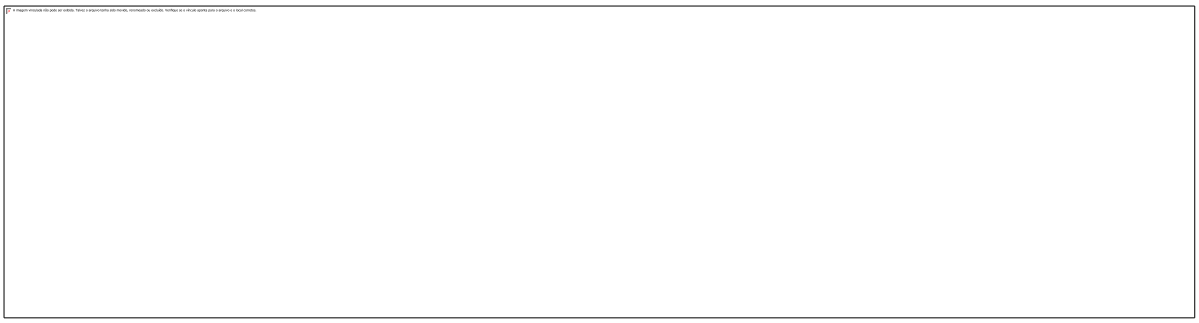


Figura 2 – Síntese de combustão. Fonte: Designer do Canva.

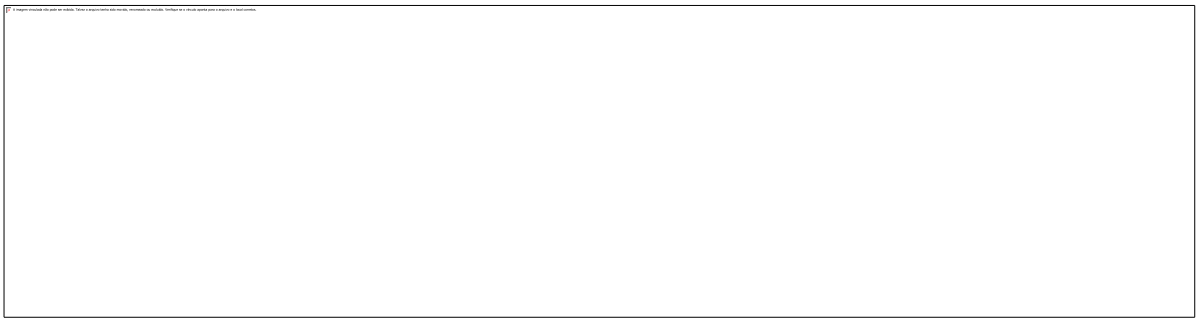


Tabela 2 – Composição elementar das amostras obtidas por FRX.

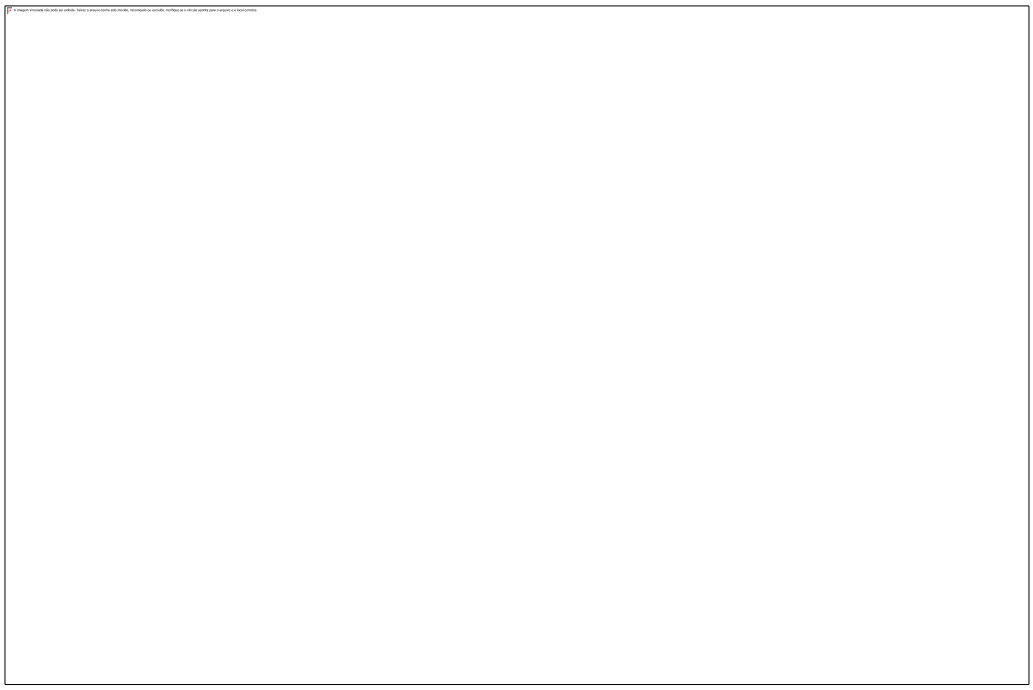


Figura 5 – Difratogramas de raios X (DRX) da perovskita La1-xCaxCo1-xMnxO3 com composição X = 0,15, calcinada a 700 °C e 900 °C por 4 h. Os dados foram obtidos por difração de raios X (XRD) e os difratogramas foram plotados utilizando o software Origin.



Figura 3 – Difratogramas de raios X (DRX) da perovskita La1-xCaxCo1-xMnxO3 com composição X = 0,05, calcinada a 700 °C e 900 °C por 4 h. Os dados foram obtidos por difração de raios X (XRD) e os difratogramas foram plotados utilizando o software Origin.

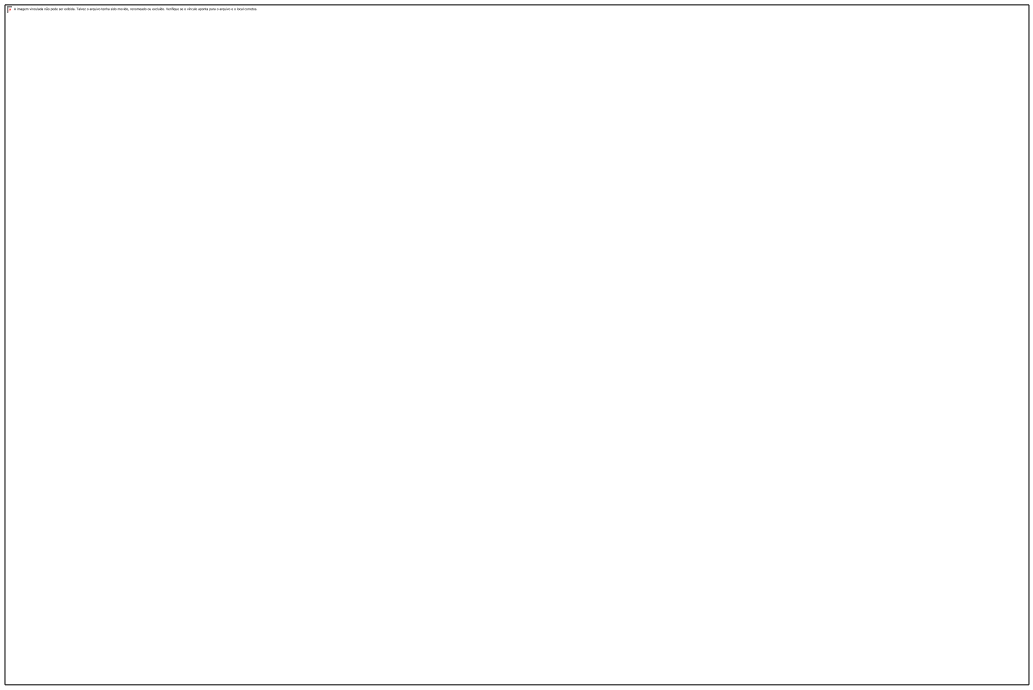


Figura 4 – Difratogramas de raios X (DRX) da perovskita La1-xCaxCo1-xMnxO3 com composição X = 0,10, calcinada a 700 °C e 900 °C por 4 h. Os dados foram obtidos por difração de raios X (XRD) e os difratogramas foram plotados utilizando o software Origin.

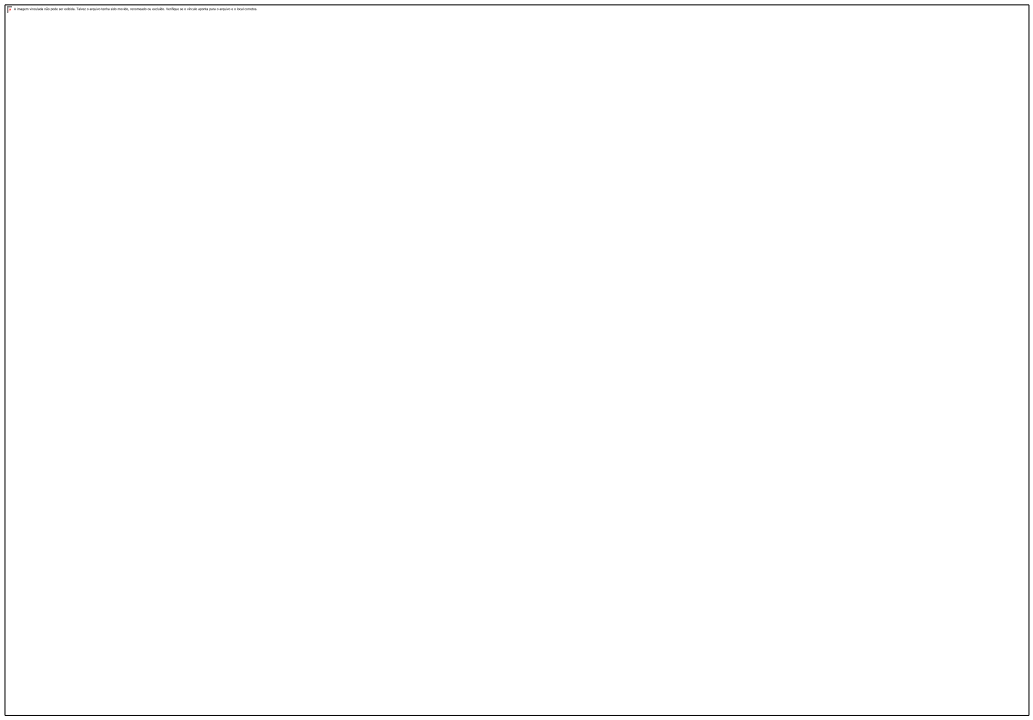


Figura 7 – Espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) da perovskita La1-xCaxCo1-xMnxO3 com X = 0,10, calcinada a 700 °C e 900 °C por 4 h, em função do número de onda (cm^-1). Os dados foram plotados utilizando o software Origin.

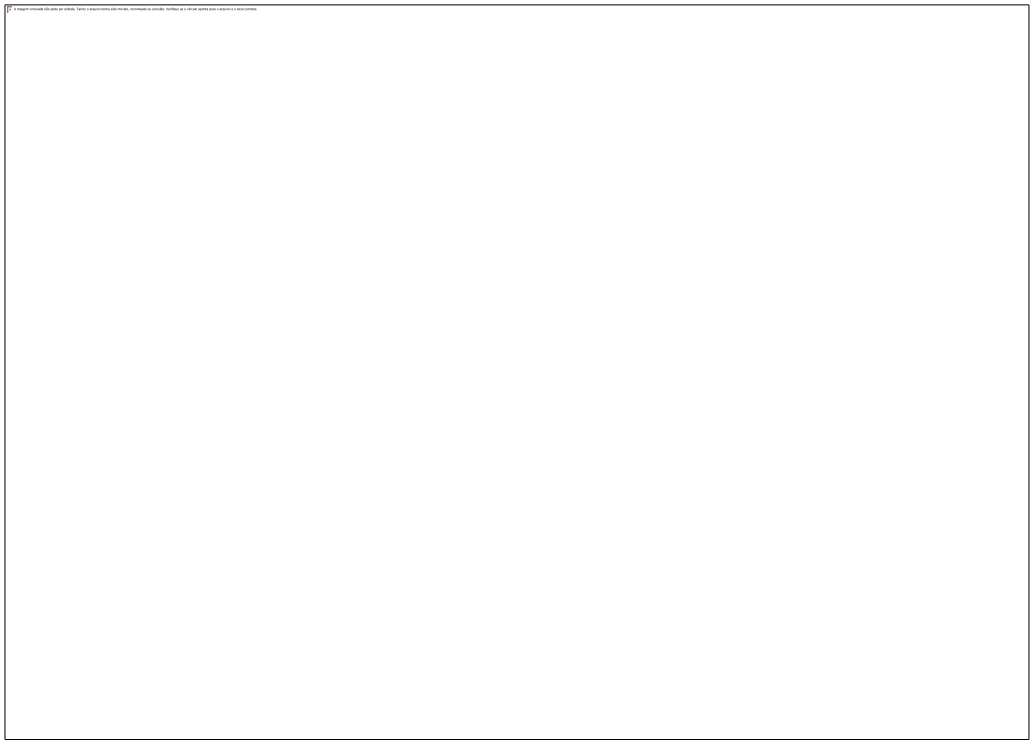


Figura 6 – Espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) da perovskita La1-xCaxCo1-xMnxO3 com X = 0,05, calcinada a 700 °C e 900 °C por 4 h, em função do número de onda (cm^-1). Os dados foram plotados utilizando o software Origin.

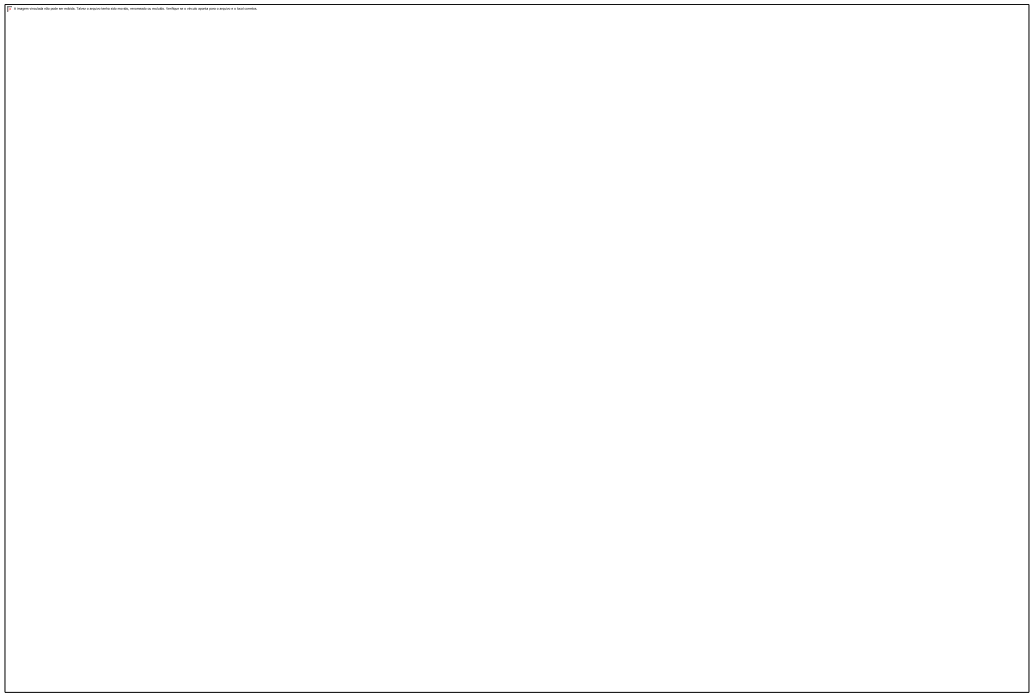


Figura 8 – Espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) da perovskita La1-xCaxCo1-xMnxO3 com X = 0,15, calcinada a 700 °C e 900 °C por 4 h, em função do número de onda (cm^-1). Os dados foram plotados utilizando o software Origin.



Figura 9 – Microscopia eletrônica de varredura das amostras a 0,05, 0,10 e 0,15 nas temperaturas de calcinação a 900° e 700°C, com ampliação de 500X. Fonte: Desenvolvida pelo autor.



Figura 10 – Microscopia eletrônica de varredura das amostras a 0,05, 0,10 e 0,15 nas temperaturas de calcinação a 900° e 700°C, com ampliação de 5KX. Fonte: Desenvolvida pelo autor.



Tabela 2 – Composição elementar das amostras obtidas por FRX.

CÓDIGO: ET0440

AUTOR: DEBORA INGRID DA SILVA GONCALVES

COAUTOR: DAVIDSON NUNES DE OLIVEIRA

COAUTOR: YASMIM ILIADA CURY RODRIGUES

COAUTOR: GUILHERME AVELINO DE LIMA MENDES

COAUTOR: VICTOR DANIEL BEVENUTO DE MEDEIROS

ORIENTADOR: FILIPE MARTEL DE MAGALHAES BORGES

TÍTULO: Síntese por combustão e caracterização estrutural da perovskita dupla $La2_{-x}Ca_xCoMnO6$ para aplicações em materiais funcionais sustentáveis.

Resumo

Os materiais funcionais têm recebido crescente atenção por seu potencial em tecnologias relacionadas à energia, eletrônica, catálise e sustentabilidade. Entre eles, as perovskitas duplas destacam-se pela flexibilidade estrutural e composicional, permitindo ajustar suas propriedades por meio do ordenamento catiônico, da substituição química e do controle de defeitos cristalinos. Esse cenário se relaciona às prioridades nacionais em materiais avançados e energias renováveis e aos impactos do El Niño sobre o setor energético. No Brasil, pesquisadoras como Ana Flávia Nogueira e Francineide Lopes de Araújo têm contribuído para o avanço de estudos com materiais perovskita e tecnologias fotovoltaicas. Este trabalho teve como objetivo sintetizar a composição $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$ pelo método de combustão, utilizando ureia como combustível, e avaliar a influência da calcinação a 900 °C sobre suas características estruturais e morfológicas. As amostras antes e após o tratamento térmico foram caracterizadas por DRX e MEV. Os resultados indicaram modificações na organização cristalina e na microestrutura, reforçando o potencial desses materiais em aplicações voltadas à conversão de energia e à sustentabilidade, em alinhamento com o ODS 7 – Energia limpa e acessível, ODS 9 – Indústria, inovação e infraestrutura, e ODS 12 – Consumo e produção responsáveis.

Palavras-chave: Ordenamento catiônico. Combustão. Energia. Sustentabilidade. Catálise.

TITLE: Combustion synthesis and structural characterization of the double perovskite $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ for applications in sustainable functional materials.

Abstract

Functional materials have received growing attention for their potential in technologies related to energy, electronics, catalysis, and sustainability. Among them, double perovskites stand out for their structural and compositional flexibility, allowing their properties to be tuned through cation ordering, chemical substitution, and defect control. This context is related to national priorities in advanced materials and renewable energy and to the impacts of El Niño on the energy sector. In Brazil, researchers such as Ana Flávia Nogueira and Francineide Lopes de Araújo have contributed to advances in perovskite materials and photovoltaic technologies. This study aimed to synthesize $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$ by the combustion method, using urea as fuel, and to evaluate the influence of calcination at 900 °C on its structural and morphological characteristics. Samples before and after heat treatment were characterized by XRD and SEM. The results indicated changes in crystalline organization and microstructure, reinforcing the potential of these materials for energy conversion and sustainable technologies, in alignment with SDG 7 – Affordable and Clean Energy, SDG 9 – Industry, Innovation and Infrastructure, and SDG 12 – Responsible Consumption and Production.

Keywords: Cation ordering. Combustion. Energy. Sustainability. Catalysis.

Introdução

Os materiais funcionais têm despertado crescente interesse científico por apresentarem propriedades elétricas, magnéticas, dielétricas, ópticas e catalíticas ajustáveis, possibilitando aplicações em eletrônica, catálise e conversão de energia (NAYAK et al., 2024; LIU et al., 2017). Entre eles, as perovskitas duplas, de fórmula geral $A_2BB'O_6$, destacam-se pela flexibilidade química e estrutural, permitindo modificar suas propriedades por meio do ordenamento catiônico, da substituição de elementos e do controle de defeitos da rede (VASALA; KARPPINEN, 2015; NAYAK et al., 2024). A Figura 1 sintetiza algumas dessas aplicações.

A relevância dessa classe também se relaciona à busca por tecnologias sustentáveis para geração e conversão de energia. No Brasil, a Portaria MCTIC nº 1.122/2020 incluiu Materiais Avançados entre as Tecnologias Habilitadoras e Energias Renováveis entre as Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável (BRASIL, 2020). Esse cenário ganha importância diante de fenômenos como o El Niño, capaz de alterar padrões de temperatura e precipitação e afetar setores como a geração de energia (INPE, 2026). Entre as tecnologias de conversão de energia, destacam-se as células fotovoltaicas. Perovskitas óxidas e perovskitas duplas vêm sendo investigadas em aplicações fotovoltaicas, fotocatalíticas e eletrocatalíticas (YIN et al., 2019). No Brasil, pesquisadoras como Ana Flávia Nogueira e Francineide Lopes de Araújo, da Unicamp, têm contribuído para estudos com materiais perovskita e dispositivos fotovoltaicos, evidenciando a participação feminina no avanço dessa área (ARAÚJO et al., 2023).

Entre as perovskitas duplas à base de lantânio, a La_2CoMnO_6 destaca-se por suas propriedades magnéticas, dielétricas e eletrônicas associadas às interações entre Co e Mn nos sítios B e B' (LIN; CHEN, 2011; SILVA et al., 2016; SHARMA et al., 2024). Seu comportamento depende do ordenamento catiônico, da distribuição de oxigênio e das distorções dos octaedros CoO_6 e MnO_6. Essas distorções estão relacionadas ao

efeito Jahn–Teller, que modifica a simetria local e as ligações metal–oxigênio, influenciando propriedades funcionais (LIU et al., 2017; SILVA et al., 2016). Vacâncias de oxigênio controladas podem modificar essas propriedades, enquanto seu excesso pode favorecer desordem estrutural e reduzir o ordenamento Co/Mn (LIU et al., 2017).

A substituição parcial de La^{3+} por Ca^{2+} constitui uma estratégia para ajustar a estrutura do sistema $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$, modificando estados de oxidação, volume da célula unitária e interações na rede cristalina (JESUS et al., 2022; MACCHIUTTI et al., 2021). Para $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$, Sahoo et al. (2019) reportaram desordem antissítio e estrutura monoclínica $P2_1/n$ obtida por refinamento de Rietveld. Entre as rotas de síntese, a combustão se destaca pela simplicidade, rapidez e formação de pós porosos (TUZA; SOUZA, 2025; LI et al., 2016).

Para contextualizar a evolução científica do tema, foi realizada análise bibliométrica de publicações indexadas na Scopus, utilizando o VOSviewer. O mapa apresentado na Figura 2 evidencia, entre 2018 e 2024, temas relacionados à síntese, vacâncias de oxigênio, catálise, células solares, fotovoltaicos, reciclagem e impacto ambiental, indicando a ampliação das pesquisas em materiais funcionais voltadas à energia e à sustentabilidade.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo realizar uma investigação inicial da composição $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$ pelo método de combustão e avaliar suas características estruturais e morfológicas antes e após a calcinação por Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), contribuindo para a compreensão da relação entre processamento, estrutura e microestrutura de materiais funcionais com potencial para aplicações tecnológicas sustentáveis.

Metodologia

A perovskita dupla $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$ foi sintetizada pelo método de combustão, utilizando ureia como combustível e agente redutor. Foram empregados como precursores nitrato de lantânio hexahidratado [$La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$] (Vetec, 99%), nitrato de cálcio tetrahidratado [$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$] (Vetec, 99%), nitrato de cobalto hexahidratado [$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$] (Vetec, 98%), cloreto de manganês tetrahidratado [$MnCl_2 \cdot 4H_2O$] (Vetec, 99%) e ureia [$CO(NH_2)_2$]. As quantidades dos reagentes foram determinadas por cálculo estequiométrico, de modo a estabelecer uma condição de combustão rica em combustível, favorecendo a formação de um precursor poroso em decorrência da intensa liberação de gases durante a reação (LI et al., 2016).

Os reagentes foram dissolvidos em água destilada e mantidos sob agitação magnética com aquecimento por aproximadamente 30 minutos a 90 °C, até a completa homogeneização da solução precursora. Após a evaporação parcial do solvente e o aumento da viscosidade, a mistura foi submetida à combustão em recipiente metálico a aproximadamente 300 °C, ocorrendo uma reação exotérmica autossustentada que resultou na formação de um pó precursor poroso, característica associada ao método de combustão (LI et al., 2016). Após a combustão, o material obtido foi macerado manualmente em almofariz para promover a desaglomeração e homogeneização do pó.

Uma fração do material foi mantida sem tratamento térmico, sendo denominada amostra não calcinada, enquanto outra fração foi submetida à calcinação em forno tipo mufla a 900 °C durante 6 horas. O tratamento térmico foi realizado com a finalidade de favorecer a organização e a cristalinidade da estrutura perovskita, uma vez que a temperatura de processamento exerce influência sobre o ordenamento catiônico, a distribuição de oxigênio e a organização estrutural das perovskitas duplas (LIU et al., 2017; SHARMA et al., 2024).

A caracterização estrutural das amostras foi realizada por difração de raios X (DRX) em difratômetro Shimadzu XRD-7000, utilizando radiação Cu-Kα, com comprimento de onda de λ = 1,5406 Å com velocidade de varredura de 1° min^{-1}. Foram analisadas as amostras antes e após a calcinação, possibilitando comparar qualitativamente a evolução da organização cristalina e o efeito do tratamento térmico sobre o material. A difração de raios X constitui uma técnica fundamental para a identificação e avaliação de fases cristalinas em materiais perovskita (SILVA et al., 2016; SHARMA et al., 2024). A caracterização morfológica foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em equipamento Hitachi TM3000. Foram obtidas micrografias das amostras não calcinada e calcinada, permitindo avaliar comparativamente a morfologia, a porosidade, o grau de aglomeração e as modificações microestruturais promovidas pelo tratamento térmico. Essa análise possibilitou relacionar as alterações morfológicas observadas à evolução estrutural do material, considerando a influência da síntese por combustão e da calcinação sobre a microestrutura das perovskitas duplas (LI et al., 2016; SHARMA et al., 2024).

Resultados e Discussões

As amostras de $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$ obtidas pelo método de combustão foram avaliadas por difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), antes e após a calcinação a 900 °C por 6 horas. A comparação entre as duas condições permite investigar as modificações estruturais e microestruturais promovidas pelo tratamento térmico, uma vez que composição e processamento exercem influência direta sobre a organização dos materiais perovskita dupla (TUZA; SOUZA, 2025; LIU et al., 2017).

A Figura 3 apresenta o difratograma de raios X da amostra sem calcinação (SC), obtida após a síntese por combustão. O padrão apresenta diversas reflexões ao longo da faixa analisada, com picos mais intensos próximos de aproximadamente 15° e entre 20° e 24° em 2θ, além de reflexões de menor intensidade em regiões próximas de 30–34°, 40° e 46°. A presença dessas reflexões demonstra que o material obtido após a combustão já apresenta regiões cristalinas, não podendo ser considerado totalmente amorfo. Observa-se também a ausência do pico característico da perovskita da região entre 30–34°.

Apesar da presença de reflexões cristalinas na Figura 3, observa-se um fundo relativamente elevado e regiões com maior alargamento, indicando que a amostra SC apresenta uma organização estrutural distinta daquela observada após o tratamento térmico. Esse comportamento pode estar associado à coexistência de diferentes constituintes formados durante a reação de combustão e a um menor grau de organização cristalina. Entretanto, a identificação dessas possíveis fases não pode ser

realizada apenas pela inspeção visual do difratograma, sendo necessária uma análise estrutural mais aprofundada.

A Figura 4 apresenta o difratograma de raios X da amostra submetida à calcinação a 900 °C por 6 horas. Em comparação com a amostra sem calcinação apresentada na Figura 3, observa-se uma alteração significativa no padrão de difração, com maior definição de determinadas reflexões e destaque para o pico de maior intensidade próximo de 32° em 2θ característica da perovskita estudada. Essas modificações sugerem que o tratamento térmico promoveu uma evolução da organização cristalina do material, alterando a distribuição e a intensidade relativa das reflexões observadas (LIU et al., 2017; SHARMA et al., 2024).

A comparação qualitativa entre o difratograma experimental da amostra calcinada apresentado na Figura 4 e o padrão cristalográfico de referência ICSD-19785 apresentado na Figura 5 indica correspondência entre determinadas reflexões experimentais e aquelas associadas à estrutura utilizada como referência, sugerindo a possível formação da fase perovskita dupla esperada. Esse comportamento é compatível com o observado por Sahoo et al. (2019) para a composição $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$, para a qual os autores identificaram estrutura monoclínica pertencente ao grupo espacial $P2_1/n$ mediante refinamento de Rietveld. Entretanto, no presente trabalho, essa comparação é apenas qualitativa e não permite confirmar definitivamente a formação ou a pureza da fase.

Para uma determinação estrutural mais segura, torna-se necessária a realização do refinamento pelo método de Rietveld, que permite ajustar o padrão de difração experimental a um modelo cristalográfico e obter informações mais precisas sobre os parâmetros estruturais e as fases presentes (RIETVELD, 1969). Assim, no estágio atual do trabalho, a comparação com o padrão cristalográfico observado na figura 5, deve ser interpretada como uma avaliação qualitativa, não sendo suficiente para confirmar definitivamente a formação ou a pureza da fase. A realização posterior do refinamento permitirá uma análise estrutural mais robusta do material. A evolução observada entre as Figuras 3 e 4 pode estar relacionada à influência da temperatura sobre o ordenamento dos cátions Co e Mn nos sítios B e B' e sobre a distribuição de oxigênio na estrutura. Liu et al. (2017) demonstraram que o ordenamento Co/Mn e a distribuição de oxigênio influenciam diretamente a organização estrutural e as propriedades eletrônicas e magnéticas da La_2CoMnO_6. Sharma et al. (2024) também destacam a relação entre as condições de processamento e as características estruturais desse sistema.

Outro aspecto importante está relacionado às distorções dos octaedros CoO_6 e MnO_6, associadas ao efeito Jahn–Teller. Esse fenômeno promove alterações na simetria local dos octaedros e modifica distâncias e ângulos das ligações metal–oxigênio, podendo afetar propriedades dielétricas, eletrônicas, magnéticas e de transporte do material (LIU et al., 2017; SILVA et al., 2016). Dessa forma, alterações na organização estrutural após a calcinação podem estar relacionadas não apenas à evolução da cristalinidade, mas também a modificações locais na disposição dos cátions e do oxigênio na rede.

A presença de vacâncias de oxigênio também exerce influência sobre a estrutura desses materiais. Concentrações controladas desses defeitos podem participar dos mecanismos de compensação de carga e modificar os estados de oxidação dos cátions, enquanto um excesso de vacâncias pode favorecer a desordem estrutural e reduzir o ordenamento

Co/Mn (LIU et al., 2017). Portanto, a calcinação não deve ser considerada simplesmente como um processo de eliminação de defeitos, mas como um tratamento capaz de modificar a distribuição de oxigênio e o equilíbrio estrutural da rede. Além disso, a substituição parcial de La^{3+} por Ca^{2+} na composição estudada interfere no equilíbrio de cargas da estrutura. Na série $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$, a incorporação de Ca pode modificar os estados de oxidação dos íons Co e Mn, o volume da célula unitária e as interações presentes na rede cristalina (JESUS et al., 2022; MACCHIUTTI et al., 2021). Para a composição $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$, Sahoo et al. (2019) também destacaram a presença de desordem antissítio, caracterizada pela ocupação parcial dos sítios cristalográficos de Co e Mn pelos cátions opostos, fenômeno capaz de modificar as interações magnéticas e a organização estrutural do material. Esses fatores demonstram que a estrutura final da $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$ depende da combinação entre substituição por Ca, ordenamento Co/Mn, distribuição de oxigênio e condições de tratamento térmico (SAHOO et al., 2019).

A Figura 6 apresenta as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra de $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$ sem calcinação, nas ampliações de 5.000×, 10.000× e 15.000×. De modo geral, observa-se uma microestrutura heterogênea, constituída por aglomerados irregulares, superfícies rugosas e regiões porosas, características compatíveis com materiais obtidos pelo método de combustão (LI et al., 2016).

Na Figura 6(A), obtida com ampliação de 5.000×, observam-se aglomerados de diferentes dimensões e morfologia irregular, com presença de cavidades e vazios distribuídos pela estrutura. Essa porosidade pode estar relacionada à intensa liberação de gases durante a reação de combustão, decorrente da decomposição da ureia e dos demais precursores empregados na síntese (LI et al., 2016). Na Figura 6(B), em 10.000×, torna-se mais evidente a elevada rugosidade superficial dos aglomerados, bem como a presença de partículas menores associadas entre si. Também são observadas cavidades e regiões de distribuição não uniforme, indicando que o material obtido diretamente após a combustão apresenta uma microestrutura pouco consolidada.

Na maior ampliação, apresentada na Figura 6(C), em 15.000×, é possível visualizar com maior clareza partículas finas agrupadas, com formas predominantemente irregulares e algumas regiões contendo partículas de aspecto mais alongado. Também são observados vazios entre as partículas, evidenciando a heterogeneidade da microestrutura. Entretanto, essas diferenças morfológicas não permitem, por si só, atribuir as partículas observadas a fases cristalinas específicas, sendo necessárias técnicas complementares para essa identificação. A análise conjunta das Figuras 6(A–C) evidencia que a amostra sem calcinação apresenta uma microestrutura fortemente aglomerada e porosa. Essa morfologia é coerente com o mecanismo da síntese por combustão, no qual a rápida reação exotérmica e a liberação de gases favorecem a formação de pós porosos e morfologicamente heterogêneos (LI et al., 2016). Como a amostra não foi submetida a tratamento térmico posterior, observa-se ainda reduzida consolidação entre as partículas.

Os resultados morfológicos apresentados na Figura 6 devem ser analisados em conjunto com o difratograma da amostra sem calcinação apresentado na Figura 3. Enquanto o DRX evidencia que o material já apresenta regiões cristalinas após a combustão, o MEV demonstra que sua microestrutura ainda é heterogênea, porosa e composta por partículas

aglomeradas. Dessa forma, as duas técnicas fornecem informações complementares sobre o estado estrutural e microestrutural da amostra antes da calcinação.

A Figura 7 apresenta as micrografias da amostra submetida à calcinação a 900 °C por 6 horas, nas ampliações de 100×, 500× e 1.000×. Como as micrografias da amostra sem calcinação apresentadas na Figura 6 foram obtidas em ampliações superiores, os dois conjuntos de imagens revelam características morfológicas em escalas distintas. Dessa forma, a comparação entre as condições deve ser realizada de maneira qualitativa, considerando principalmente o aspecto geral dos aglomerados, a rugosidade e a presença de regiões porosas, evitando comparações diretas de tamanho de partículas ou grau de coalescência.

Na Figura 7(a), obtida em 100×, observa-se uma distribuição de aglomerados de diferentes dimensões, evidenciando a heterogeneidade morfológica da amostra calcinada. Na Figura 6(b), em 500×, torna-se mais evidente a associação entre os aglomerados e a irregularidade de suas superfícies. Na Figura 7(c), em 1.000×, observam-se superfícies rugosas e regiões porosas distribuídas entre os aglomerados. A permanência dessa porosidade após a calcinação pode estar relacionada à morfologia desenvolvida durante a síntese por combustão, na qual a intensa liberação de gases favorece a formação de estruturas porosas (LI et al., 2016).

Embora as Figuras 6 e 7 tenham sido obtidas em diferentes faixas de ampliação, a análise qualitativa dos dois conjuntos de micrografias permite observar que ambas as amostras apresentam morfologia heterogênea, aglomerados irregulares e regiões porosas. Na amostra sem calcinação, as maiores ampliações da Figura 6 evidenciam partículas finas agrupadas e vazios interpartículas, enquanto as imagens da amostra calcinada na Figura 7, obtidas em menores ampliações, mostram a distribuição geral dos aglomerados e a permanência de porosidade após o tratamento térmico. Dessa forma, devido à diferença de escala entre as micrografias, não é possível estabelecer uma comparação quantitativa direta do tamanho das partículas ou do grau de coalescência entre as duas condições. Entretanto, os resultados demonstram que a morfologia porosa característica da síntese por combustão permanece presente mesmo após a calcinação (LI et al., 2016).

Ao mesmo tempo, parte da porosidade permanece presente nas duas condições, característica associada à rota de síntese por combustão. A porosidade residual observada na Figura 7 pode apresentar interesse para aplicações dependentes da interação superficial, como processos catalíticos. Li et al. (2016) demonstraram que características estruturais e superficiais de materiais contendo La_2CoMnO_6 podem influenciar seu comportamento em processos de combustão catalítica. Entretanto, como neste trabalho é uma pesquisa inicial ainda não foram realizadas medidas de área superficial nem ensaios catalíticos, não é possível afirmar que a morfologia observada resulte diretamente em melhor desempenho catalítico.

A análise conjunta das Figuras 3, 4, 5, 6 e 7 evidencia que o tratamento térmico promoveu modificações na organização estrutural e na microestrutura da amostra. Os difratogramas das Figuras 3 e 4 mostram que a amostra sem calcinação já apresenta caráter cristalino, enquanto o padrão da amostra calcinada sofre alterações significativas, indicando uma reorganização estrutural após o tratamento térmico. O padrão experimental da amostra calcinada apresentado na Figura 4 apresenta indícios de

compatibilidade com o padrão cristalográfico observado na figura 5, utilizado como referência para a comparação qualitativa. Entretanto, essa correspondência não permite confirmar de forma definitiva a formação da fase $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$ nem excluir a presença de possíveis fases secundárias. Para uma determinação estrutural mais precisa, incluindo a avaliação dos parâmetros cristalográficos e das fases presentes, torna-se necessária a realização do refinamento pelo método de Rietveld (RIETVELD, 1969; SAHOO et al., 2019).

De forma complementar, as micrografias das Figuras 6 e 7 evidenciam a natureza heterogênea e porosa das amostras antes e após a calcinação. Entretanto, considerando que as imagens foram obtidas em diferentes ampliações, a análise morfológica não permite estabelecer uma comparação direta do tamanho das partículas ou do grau de coalescência entre as duas condições. Os resultados de MEV demonstram principalmente a presença de aglomerados irregulares, superfícies rugosas e regiões porosas, características associadas à rota de síntese por combustão (LI et al., 2016). Dessa forma, os resultados de DRX e MEV fornecem informações complementares sobre as modificações estruturais e morfológicas promovidas pelo tratamento térmico, sem que seja possível, no estágio atual do estudo, confirmar definitivamente a formação da fase esperada.

Conclusão

A síntese por combustão permitiu a obtenção de pós com composição nominal $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$, cuja evolução estrutural e morfológica foi avaliada antes e após a calcinação a 900 °C por 6 horas. Os resultados de difração de raios X mostraram que a amostra sem calcinação apresenta caráter cristalino, enquanto o tratamento térmico promove alterações significativas no padrão de difração, indicando reorganização estrutural do material. A comparação qualitativa do difratograma da amostra calcinada com o padrão cristalográfico ICSD-19785, como mostrado na figura 5, revelou reflexões compatíveis com a estrutura utilizada como referência, sugerindo a possível formação da fase perovskita dupla esperada. Entretanto, essa comparação não permite confirmar de forma definitiva a formação ou a pureza da fase. Para uma determinação estrutural mais precisa, incluindo a avaliação de possíveis fases secundárias e dos parâmetros cristalográficos, será necessária a realização do refinamento pelo método de Rietveld (RIETVELD, 1969; SAHOO et al., 2019).

As análises por microscopia eletrônica de varredura evidenciaram, nas amostras antes e após a calcinação, uma microestrutura heterogênea, constituída por aglomerados irregulares, superfícies rugosas e regiões porosas, características associadas à rota de síntese por combustão (LI et al., 2016). Como as micrografias das duas condições foram obtidas em diferentes ampliações, não é possível estabelecer uma comparação direta do tamanho das partículas ou do grau de coalescência entre as amostras.

Dessa forma, a análise conjunta de DRX e MEV demonstra que o tratamento térmico promoveu modificações na organização estrutural e na microestrutura do material, embora a confirmação da fase cristalina ainda dependa do refinamento de Rietveld. O estudo contribui para a compreensão da relação entre processamento, estrutura e

morfologia de materiais funcionais obtidos por combustão. Como continuidade, caracterizações dielétricas, magnéticas, ópticas e catalíticas poderão aprofundar a investigação das propriedades funcionais da $La_{1.5}Ca_{0.5}CoMnO_6$ e de seu potencial para aplicações em conversão de energia e tecnologias sustentáveis (YIN et al., 2019; LIN; CHEN, 2011), incluindo estudos futuros relacionados a sistemas fotovoltaicos.

Referências

ARAÚJO, F. L. de; NOGUEIRA, A. F.; FREITAS, J. N. de. Facile methods for the assembly of large-area perovskite solar cells and mini-module: a step-by-step description of layers processing. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 34, n. 6, p. 794-808, 2023. Disponível em: DOI: 10.21577/0103-5053.20220148. Acesso em: 28 ago. 2026.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Portaria nº 1.122, de 19 de março de 2020. Define as prioridades, no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), no que se refere a projetos de pesquisa, de desenvolvimento de tecnologias e inovações, para o período 2020 a 2023. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 19, 24 mar. 2020. Disponível em: Portaria MCTIC nº 1.122/2020. Acesso em: 27 ago. 2026.

FIZ KARLSRUHE. Inorganic Crystal Structure Database (ICSD): collection code 19785. Karlsruhe: FIZ Karlsruhe, [s.d.]. Disponível em: https://icsd.products.fiz-karlsruhe.de/en. Acesso em: 25 ago. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Nota técnica conjunta aponta alta probabilidade de El Niño no segundo semestre de 2026. São José dos Campos, 23 jun. 2026. Disponível em: Nota técnica sobre El Niño 2026. Acesso em: 24 ago. 2026.

JESUS, J. R.; BUFAIÇAL, L.; BITTAR, E. M. The spontaneous exchange bias effect in $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ series. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 556, p. 169402, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169402, Acesso em: 11 jun. 2026.

LI, J.; HU, R.; ZHANG, J.; MENG, W.; DU, Y.; SI, Y.; ZHANG, Z. Influence of preparation methods of La_2CoMnO_6/CeO_2 on the methane catalytic combustion. Fuel, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.041. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.041. Acesso em: 11 jun. 2026.

LIN, Y. Q.; CHEN, X. M. Dielectric, ferromagnetic characteristics, and room-temperature magnetodielectric effects in double perovskite La_2CoMnO_6 ceramics. Journal of the American Ceramic Society, v. 94, n. 3, p. 782-787, 2011. Disponível em: DOI: 10.1111/j.1551-2916.2010.04139.x. Acesso em: 11 jun. 2026.

LIU, F.; GAO, Y.; CHANG, H.; LIU, Y.; YUN, Y. Control of magnetic properties and band gap by Co/Mn ordering and oxygen distributions of La_2CoMnO_6. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 435, p. 217-222, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.03.040. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885317302354. Acesso em: 11 jun. 2026.

MACCHIUTTI, C. et al. Absence of zero-field-cooled exchange bias effect in single crystalline $La_{2-x}A_xCoMnO_6$ (A = Ca, Sr) compounds. Physical Review Materials, v. 5, p. 094402, 2021. Disponível em: https://journals.aps.org/prmaterials/abstract/10.1103/PhysRevMaterials.5.094402. Acesso em: 11 jun. 2026.

NAYAK, Jagadish Parsad et al. A comprehensive review of bismuth, lanthanum and strontium based double perovskites − Unravelling structural, magnetic, and dielectric properties. Inorganic Chemistry Communications, v. 170, art. 113259, 2024. Disponível em: DOI: https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113259. Acesso em: 20 ago. 2026.

RIETVELD, H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. Journal of Applied Crystallography, v. 2, n. 2, p. 65-71, 1969. Disponível em: DOI: 10.1107/S0021889869006558. Acesso em: 29 ago. 2026.

SAHOO, R. C.; DAS, S.; NATH, T. K. Antiferromagnetic ordering in 25% Ca doped antisite-disordered ferromagnetic La_2CoMnO_6 double perovskite. Materials Today: Proceedings, v. 11, p. 724-728, 2019. Disponível em: DOI: 10.1016/j.matpr.2019.03.034. Acesso em: 29 ago. 2026.

SHARMA, R.; HOODA, N.; HOODA, A.; KHASA, S. Structural, dielectric and magnetic study of double perovskite La_2CoMnO_6. Physica B: Condensed Matter, v. 673, p. 415473, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415473. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921452623008402. Acesso em: 11 jun. 2026.

SILVA, R. X.; MENEZES, A. S.; ALMEIDA, R. M.; MOREIRA, R. L.; PANIAGO, R.; MARTI, X.; REICHLOVÁ, H.; MARYŠKO, M.; REZENDE, M. V. S.; PASCHOAL, C. W. A. Structural order, magnetic and intrinsic dielectric properties of magnetoelectric La_2CoMnO_6. Journal of Alloys and Compounds, v. 661, p. 541-552, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838815316546. Acesso em: 11 jun. 2026.

TUZA, P. V.; SOUZA, M. M. V. M. A review of synthesis, characterization, properties, and applications of double perovskite oxides. Inorganics, v. 13, n. 11, art. 372, 2025. Disponível em: DOI: 10.3390/inorganics13110372. Acesso em: 29 ago. 2026.

VASALA, S.; KARPPINEN, M. $A_2B'B''O_6$ perovskites: a review. Progress in Solid State Chemistry, v. 43, n. 1-2, p. 1-36, 2015. Disponível em: DOI: 10.1016/j.progsolidstchem.2014.08.001. Acesso em: 29 ago. 2026.

YIN, W.-J.; WENG, B.; GE, J.; SUN, Q.; LI, Z.; YAN, Y. Oxide perovskites, double perovskites and derivatives for electrocatalysis, photocatalysis, and photovoltaics. Energy & Environmental Science, v. 12, p. 442-462, 2019. Disponível em: DOI: 10.1039/C8EE01574K. Acesso em: 11 jun. 2026.

Anexos

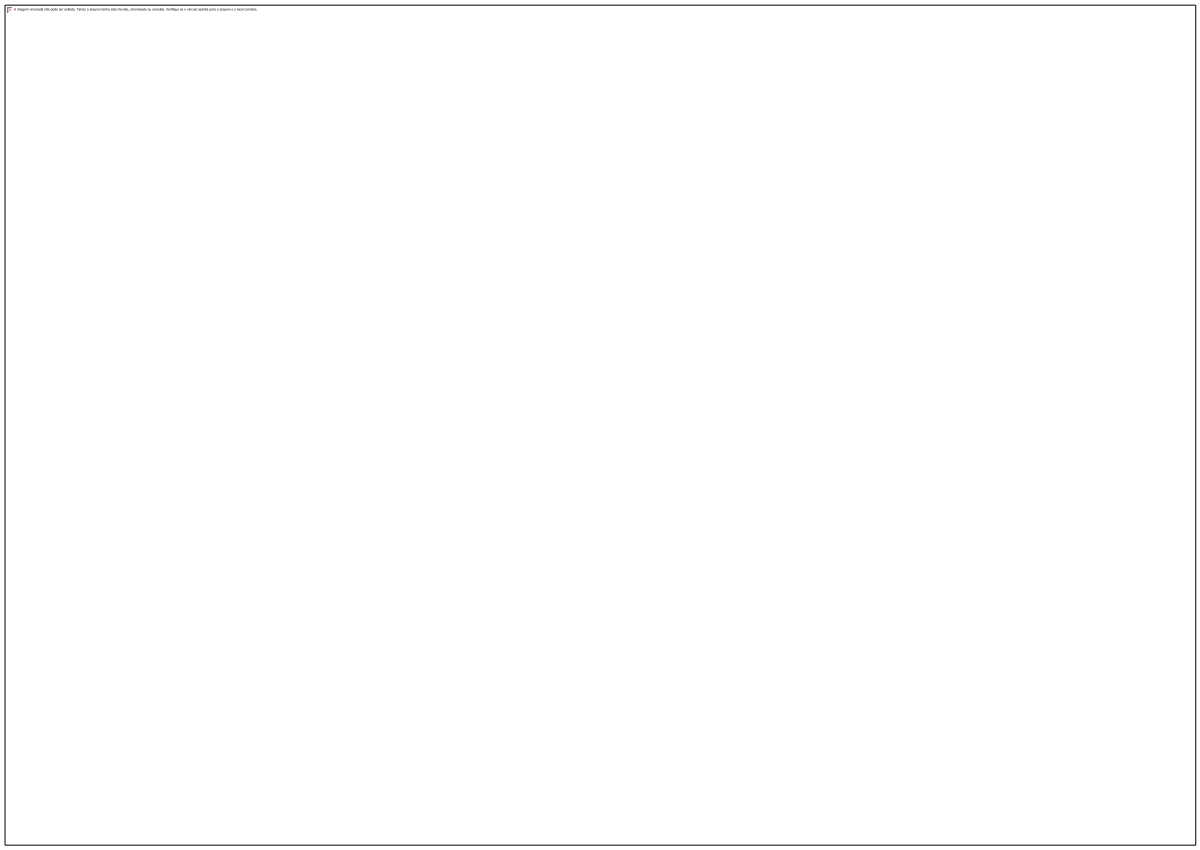


Figura 1 – Principais aplicações dos materiais funcionais em energia, catálise, eletrônica e sustentabilidade. Fonte: Autoria própria, elaborada no Canva.

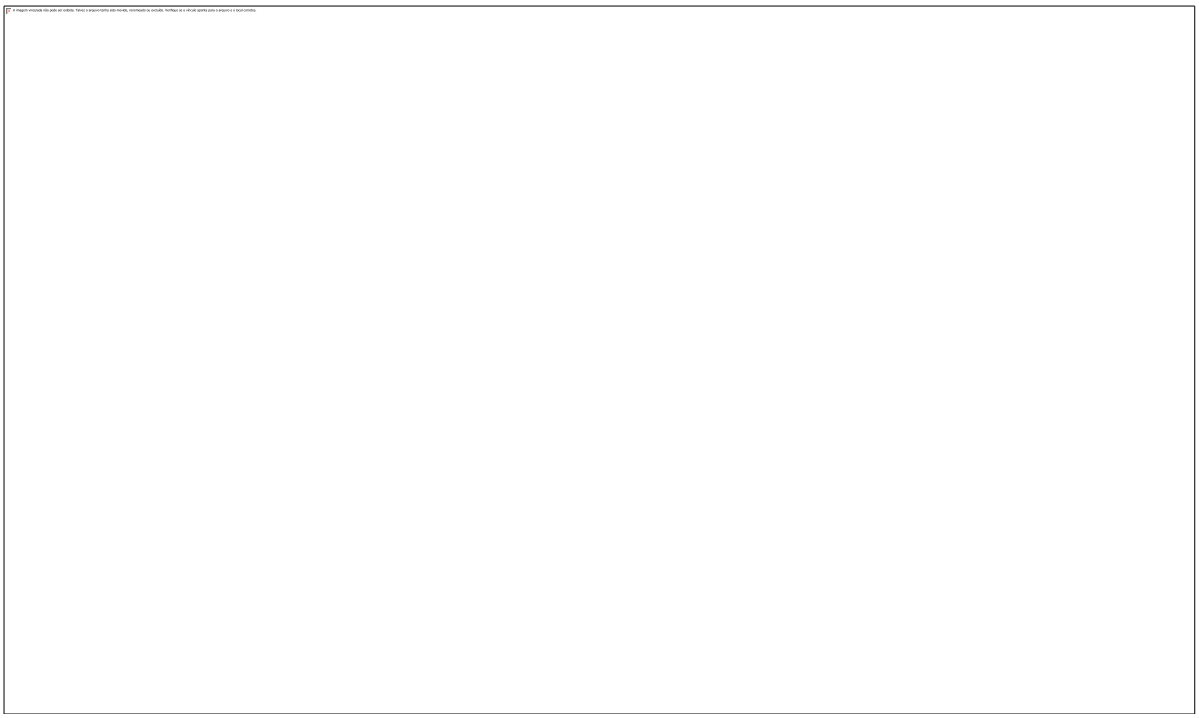


Figura 2 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras-chave com visualização temporal da produção científica (2018–2024). Fonte: Autoria própria, elaborada no VOSviewer com dados da Scopus (Elsevier).



Tabela 1 – Reagentes utilizados na síntese da perovskita dupla La1.5Ca0.5CoMnO6. Fonte: Autoria própria.



Figura 3 – Difratograma de raios X da amostra de La1.5Ca0.5CoMnO6 sem calcinação (SC). Fonte: Autoria própria

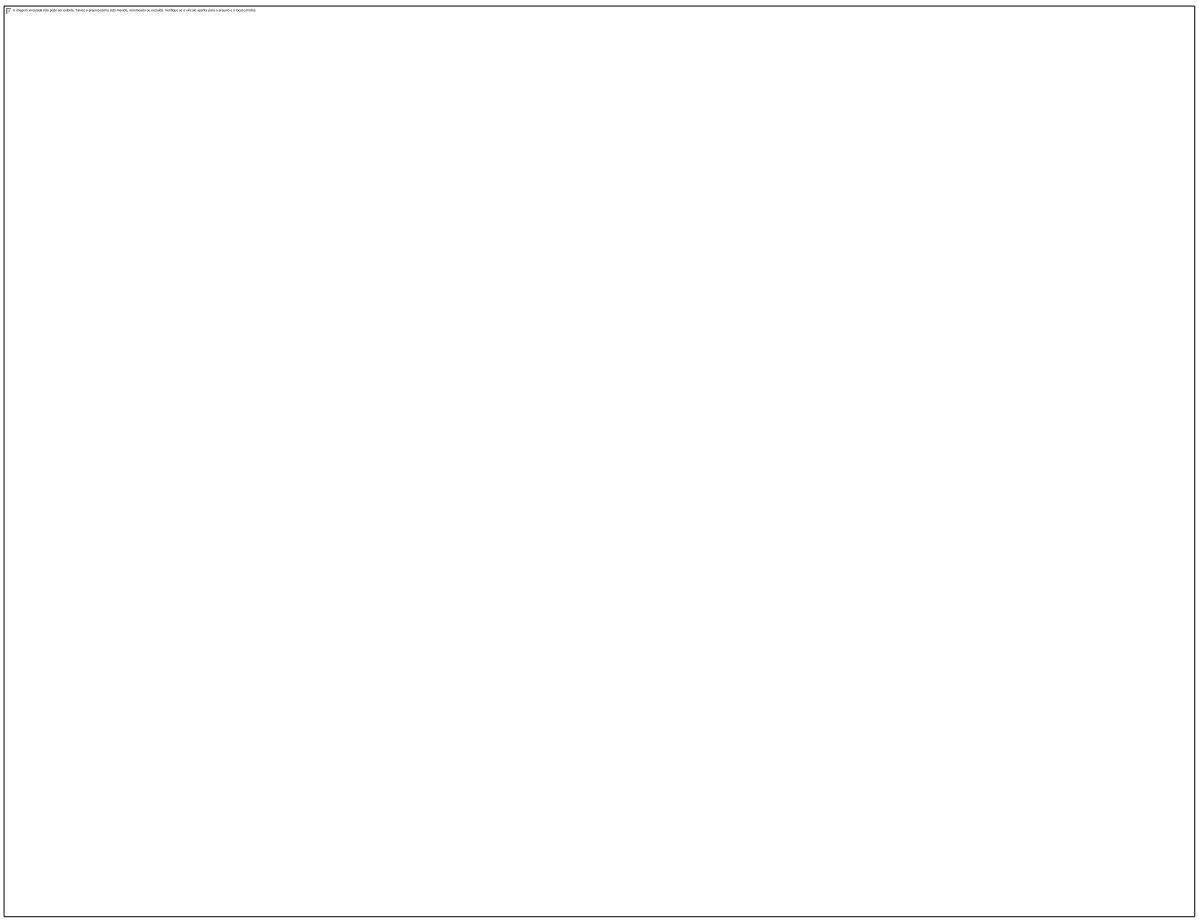


Figura 4 – Difratograma de raios X da amostra de La1.5Ca0.5CoMnO6 calcinada a 900 °C. Fonte: Autoria própria

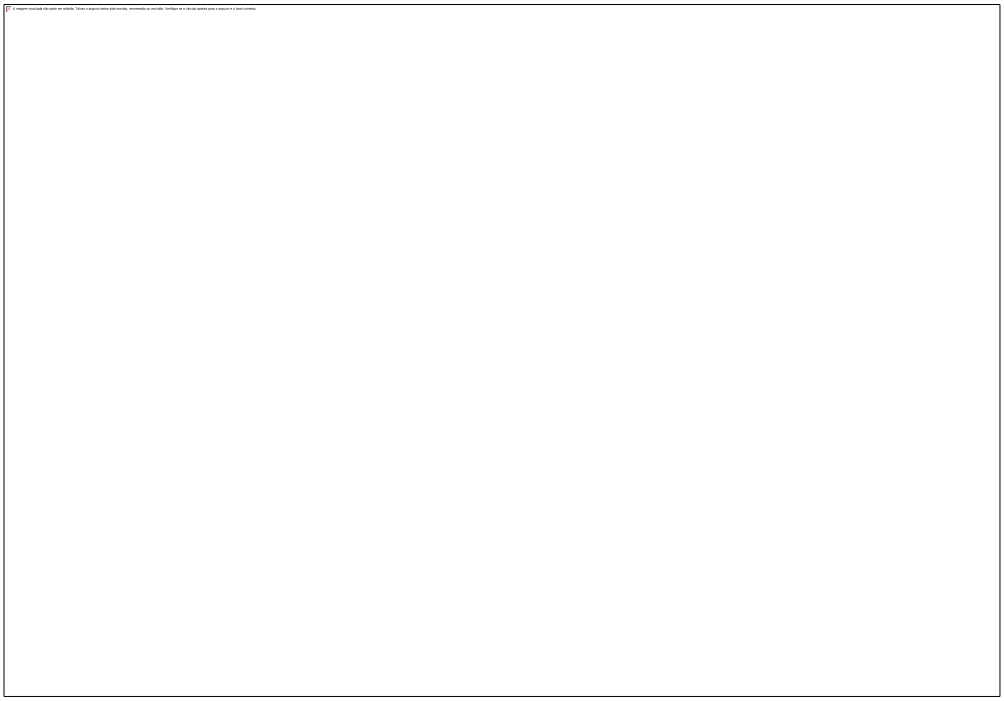


Figura 5 – Padrão cristalográfico de referência utilizado para comparação com a amostra calcinada, correspondente ao registro ICSD-19785. Fonte: Inorganic Crystal Structure Database (ICSD), registro ICSD-19785 (FIZ KARLSRUHE, [s.d.]).



Figura 6 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra de La1.5Ca0.5CoMnO6 sem calcinação nas ampliações de (A) 5000×, (B) 10000× e (C) 15000×. Fonte: Autoria própria



Figura 7 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da perovskita dupla La1.5Ca0.5CoMnO6 calcinada a 900 °C nas ampliações de (a) 100×, (b) 500× e (c) 1000×. Fonte: Autoria própria

CÓDIGO: ET0447

AUTOR: VITORIA KATHERINE DO NASCIMENTO

ORIENTADOR: CAMILA PACELLY BRANDÃO DE ARAÚJO

TÍTULO: Desenvolvimento de nanomateriais para fins de armazenamento de H2 em fase líquida orgânica

Resumo

A transição energética global exige o desenvolvimento de vetores eficientes e seguros para o armazenamento de hidrogênio (H_2). Os carreadores orgânicos de hidrogênio em fase líquida (LOHC) destacam-se como uma solução promissora para o transporte e estocagem em condições ambientes. No entanto, a eficiência desse processo depende fundamentalmente do projeto de catalisadores heterogêneos de alta performance para as reações de hidrogenação e desidrogenação. Este trabalho investiga o desenvolvimento e a otimização de nanomateriais baseados em metais de transição para aplicação em sistemas LOHC. A síntese dos nanomateriais foi realizada via reação gás-sólido em reator de leito fixo, utilizando precursores moleculares e atmosfera reativa controlada. A caracterização estrutural por Difração de Raios X (DRX) e refinamento Rietveld confirmou a formação de fases nanocristalinas com elevada área superficial e distribuição homogênea de sítios ativos. A caracterização microestrutural indicou elevado potencial do nanomaterial para aplicação catalítica em sistemas de armazenamento de H_2 em LOHC. Os resultados evidenciam o elevado potencial dessa rota sintética sustentável para a produção de nanocatalisadores eficientes, viabilizando o armazenamento seguro de H_2 e impulsionando a consolidação da economia de carbono.

Palavras-chave: Armazenamento de H2. Nanomateriais. LOHC. Catálise heterogênea.

TITLE: Development of nanomaterials for hydrogen storage in liquid organic phase

Abstract

The global energy transition demands the development of efficient and safe vectors for hydrogen (H_2) storage. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs) emerge as a promising solution for ambient-condition transport and storage. However, process efficiency strictly depends on designing high-performance heterogeneous catalysts for hydrogenation and dehydrogenation reactions. This study investigates the development

and optimization of transition-metal-based nanomaterials for LOHC applications. Synthesis was performed via gas-solid reaction in a fixed-bed reactor, using molecular precursors and controlled reactive atmospheres. Structural characterization by X-ray Diffraction (XRD) and Rietveld refinement confirmed the formation of nanocrystalline phases with high surface area and homogeneous active site distribution. Microstructural characterization indicated high potential of the nanomaterial for catalytic application in LOHC hydrogen storage systems. These findings highlight the strong potential of this sustainable synthetic route for producing highly efficient nanocatalysts, enabling safe H_2 storage and fostering a low-carbon economy.

Keywords: H2 storage. Nanomaterials. LOHC. Heterogeneous catalysis.

Introdução

A transição energética rumo a uma economia descarbonizada exige soluções inovadoras para o armazenamento e transporte eficiente do hidrogênio (H_2), considerado um vetor energético chave para a sustentabilidade global. Embora o H_2 possua uma densidade de energia gravimétrica excepcionalmente alta, sua baixa densidade volumétrica em condições normais de temperatura e pressão impõe severas barreiras logísticas e operacionais para a estocagem sob alta pressão ou liquefação criogênica. Nesse cenário, os Carreadores Orgânicos de Hidrogênio em Fase Líquida (LOHC, do inglês Liquid Organic Hydrogen Carriers) emergem como uma alternativa altamente estratégica e segura, permitindo o armazenamento quimissorvido de H_2 em compostos orgânicos líquidos com propriedades físico-químicas semelhantes aos combustíveis fósseis convencionais, aproveitando a infraestrutura de distribuição já existente (Preuster et al., 2017; Niermann et al., 2019).

A eficiência do ciclo de carga (hidrogenação) e descarga (desidrogenação) de sistemas LOHC é estritamente governada pelo desempenho de catalisadores heterogêneos. Historicamente, metais nobres (como Pt, Pd e Ru) têm sido empregados nesses processos devido à sua alta atividade intrínseca; contudo, a escassez, o elevado custo e a susceptibilidade ao envenenamento restringem sua escalabilidade industrial. Em contrapartida, nitretos e carbetos de metais de transição (como WN_x e MoN_x) vêm se destacando por apresentarem estrutura eletrônica semelhante à dos metais do grupo da platina (Oyama, 1992), exibindo excelente condutividade, estabilidade térmica e resistência química ao envenenamento por impurezas (Jaggers et al., 1990; Liu et al., 2016). Recentes avanços na engenharia de nanocatalisadores demonstraram que o controle morfológico e a modulação dos sítios ativos em escala nanométrica são determinantes para maximizar a densidade de corrente de troca e reduzir a energia de ativação nas reações de conversão energética (Muthukrishnan et al., 2025; Ma & Zeng, 2026).

Neste contexto, a síntese sustentável de nanomateriais via reação gás-sólido em reator de leito fixo destaca-se por oferecer menor consumo energético, controle rigoroso de estequiometria e eliminação de precursores tóxicos. A utilização de precursores moleculares complexos, como o paratungstato de amônia, possibilita a geração in situ de agentes redutores/nitretantes (como a amônia), favorecendo a formação de fases

nanocristalinas a temperaturas substancialmente mais baixas do que as rotas convencionais (Silva et al., 2023; Zang et al., 2026). A compreensão detalhada da cinética reacional e da janela de estabilidade térmica do nanomaterial é fundamental para preservar sua elevada área superficial e prevenir a desativação da fase ativa durante os ciclos catalíticos.

Diante do exposto, este estudo investiga o desenvolvimento e a avaliação microestrutural de nanomateriais de nitreto de tungstênio obtidos via reação gás-sólido em reator de leito fixo, visando sua aplicação como catalisadores eficientes para o armazenamento e liberação de H_2 em sistemas LOHC. O trabalho alinha-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, destacando-se o ODS 7 (Energia limpa e acessível) e o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura) ao promover rotas de síntese sustentáveis para impulsionar a economia do hidrogênio, e o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) ao contribuir para a mitigação das emissões de carbono na matriz energética.

Metodologia

O presente trabalho adotou uma abordagem experimental sistemática para avaliar a síntese e otimização de nanomateriais à base de nitreto de tungstênio (WN_x) a partir do precursor sólido paratungstato de amônia tetrahidratado ($(NH_4)_{10}[H_2W_{12}O_{42}]\cdot 5H_2O$),Sigma-Aldrich, pureza ≥ 99%), visando a obtenção de catalisadores heterogêneos de elevada área superficial para aplicação no armazenamento e liberação de H_2 em sistemas LOHC. A síntese foi conduzida em um reator de leito fixo por meio da reação gás-sólido. Os gases utilizados para compor a atmosfera reacional foram nitrogênio (Nitrogênio, White Martins, 99,998%) e NH_3 (Amônia, White Martins, 99,999% de pureza).

O procedimento experimental foi estruturado em quatro etapas fundamentais:

Preparação e condicionamento da Carga: Uma massa pré-determinada do precursor sólido (0,5 a 3,0 g) foi pesada em balança analítica de precisão e distribuída de forma homogênea em um cadinho de alumina sinterizada, o qual foi posicionado estrategicamente na zona isotérmica central de um forno tubular de quartzo.

Purga e inertização do sistema: O reator foi hermeticamente selado e submetido a três ciclos consecutivos de purga sob fluxo contínuo de N_2 (15 L/h por 20 min) para eliminar completamente resíduos de oxigênio e umidade atmosférica, garantindo um ambiente inerte antes do tratamento térmico.

Termólise, redução e nitretação: O sistema foi aquecido até as temperaturas finais de reação programadas (600 °C, 700 °C e 800 °C), utilizando taxas de aquecimento controladas de 1 a 10 °C/min. A reação ocorreu sob fluxo contínuo e controlado da mistura gasosa reacional (N_2, NH_3, em proporções variáveis e vazões totais ajustadas entre 5 e 30 L/h), mantendo-se patamares isotérmicos para promover a decomposição do precursor e a nitretação da matriz sólida.

Resfriamento e passivação controlada: Após o período de reação, o aquecimento do forno foi interrompido e as amostras foram resfriadas até a temperatura ambiente sob fluxo constante de N_2 inerte, prevenindo a reoxidação prematura do nanomaterial obtido antes da coleta.

2.1 PARÂMETROS OPERACIONAIS E CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

O estudo permitiu a investigação de cinco principais fatores:

Temperatura de reação na zona isotérmica: 600 °C, 700 °C e 800 °C;

Taxas de aquecimento do sistema: 1 -10ºC/ min;

Vazão volumétrica da mistura gasosa reacional: 5-30 L/h;

Composição e razão molar da mistura gasosa (N_2/NH_3): razões variáveis;

Massa inicial do precursor sólido: 0,5 - 3,0 g.

2.2 BASES CIENTÍFICAS PARA AS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

A definição das condições de síntese fundamentou-se no arcabouço teórico e empírico da literatura especializada:

Estudos de cinética de nitretação e redução termoquímica via reação gás-sólido em leito fixo (Medeiros, 2002; Silva, 2017);

Desenvolvimento recente de nitretos de metais de transição via rotas limpas e eficientes (Silva et al., 2023);

Estratégias de controle cinético e modulação de fases em nitretos/carbetos para otimização de sítios catalíticos ativos (Zang et al., 2026);

Aplicações de nanomateriais cerâmicos de metais de transição na eletrocatálise e na estocagem de vetores energéticos limpos como o hidrogênio (Muthukrishnan et al., 2025; Ma & Zeng, 2026).

2.3 METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Os nanomateriais sintetizados foram submetidos a um rigoroso protocolo de caracterização físico-química:

Difração de Raios X (DRX): Para determinação das fases cristalinas formadas, identificação dos planos de difração e avaliação do perfil de cristalinidade em função da temperatura.

Refinamento Rietveld: Para quantificação percentual das fases presentes, cálculo dos parâmetros de rede e estimativa do tamanho médio dos nanocristalinos.

Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada à Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV/EDS): Para avaliação da morfologia superficial, textura dos grãos e análise da distribuição elementar quantitativa (W, N, O).

2.4 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

Os padrões de difração obtidos foram processados e indexados por meio do confronto direto com as fichas cristalográficas de referência da base de dados JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards). A evolução das fases foi correlacionada com a cinética de decomposição e a influência da liberação in situ de NH_3 sobre a nucleação do nanomaterial.

Resultados e Discussões

A caracterização microestrutural dos nanomateriais sintetizados via reação gás-sólido em reator de leito fixo revelou uma dependência crítica entre a temperatura de calcinação/nitretação e a formação das fases cristalinas do nitreto de tungstênio (WN_x). A escolha do paratungstato de amônia tetrahidratado ($(NH_4)_{10}[H_2W_{12}O_{42}]\cdot 5H_2O$) como precursor molecular mostrou-se altamente estratégica. Por se tratar de um sal complexo que sofre decomposição térmica em temperaturas brandas, ele facilita os processos concomitantes de redução e nitretação via fluxo de N_2/NH_3 quando comparado ao uso de óxidos estáveis comerciais (como o WO_3), que possuem menor área superficial e exigem temperaturas significativamente mais elevadas.

Os difratogramas de raios X obtidos para as amostras tratadas a 600 °C, 700 °C e 800 °C evidenciaram a nítida evolução das fases cristalinas e do grau de ordenamento estrutural da matriz sólida em função do aporte térmico. Os picos de difração foram devidamente indexados em relação aos arquivos de referência do banco de dados cristalográfico JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

Na amostra tratada a 600 °C, o padrão de difração de raios X revelou uma estrutura predominantemente bifásica e de baixa cristalinidade. Os picos foram indexados à fase WO_2 monoclínica (JCPDS nº 00-032-1393, grupo espacial $P2_1/n$) é à fase WO_3 ortorrômbica (JCPDS nº 00-020-1324, grupo espacial P/E). A presença de reflexões largas (broadening) e de baixa intensidade relativa reflete uma cristalinidade incipiente e a presença de nanocristalinos nos estágios iniciais de nucleação. Esse comportamento cinético inicial assemelha-se ao observado por Silva (2017) ao utilizar precursores oxálicos de nióbio, nos quais o perfil amorfo e a baixa intensidade dos picos caracterizam a etapa inicial de desidratação e remoção de amônia da estrutura do precursor.

Ao elevar a temperatura para 700 °C, observou-se uma transição microestrutural marcante. Os difratogramas registraram a nucleação bem-sucedida da fase nitretada alvo. Identificou-se a presença proeminente da fase cúbica $W_{2.00}$ (JCPDS nº 96-900-8559, grupo espacial Im-3m) e da fase nitretada W_2N, caracterizada por picos alagados nas posições angulares (2θ) de aproximadamente 37,5° e 43,5°, correspondentes aos planos cristalográficos (111) e (200). A coexistência da fase WO_3 monoclínica residual (JCPDS

nº 01-088-0545, grupo espacial Pc) nesta temperatura indica que o processo de substituição de oxigênio por nitrogênio na rede cristalina ainda não havia atingido a completude, sinalizando a necessidade de otimização no tempo de residência no patamar isotérmico para atingir a conversão total.

Na amostra submetida a 800 °C, atingiu-se o ponto culminante da evolução cristalina, com picos de difração extremamente intensos, definidos e estreitos, confirmando o crescimento dos cristalitos e o elevado grau de ordenamento de longa distância. Contudo, o refinamento das fases revelou a predominância de tungstênio metálico (W) de estrutura cúbica (JCPDS nº 01-089-3012, grupo espacial Im-3m), acompanhado por traços da fase WO_3 monoclínica (JCPDS nº 01-088-0545). Este resultado é de fundamental importância: ele demonstra que, embora a temperatura de 800 °C favoreça a alta cristalinidade, ela ultrapassou o limite de estabilidade termodinâmica do nitreto sob a atmosfera reacional utilizada, desencadeando a desnitretação parcial e a redução ao estado metálico.

A obtenção de fases nitretadas altamente reativas em temperaturas significativamente inferiores às relatadas na literatura tradicional representa um avanço expressivo para a produção sustentável de nanocatalisadores aplicados ao armazenamento de H_2 em LOHC. Na síntese de nitreto de nióbio (NbN) a partir de Nb_2O_5 comercial, por exemplo, a conversão a 900 °C resulta apenas no intermediário NbO_2, sendo exigidas temperaturas de até 1100 °C para a nitretação completa (Silva, 2017). No presente estudo, a nitretação da matriz de tungstênio foi alcançada a 700 °C — uma redução de aproximadamente 300 °C na temperatura do processo.

Essa eficiência acentuada atribui-se à reatividade intrínseca do paratungstato de amônia. Durante a decomposição térmica do precursor salino, ocorre a liberação in situ de amônia (NH_3) gasosa no interior do leito reacional. Essa amônia gerada localmente atua como um agente nitretante e redutor extremamente eficiente, reduzindo os óxidos sub-estequiométricos (WO_{3-x}) formados e acelerando a incorporação de nitrogênio na matriz sólida. Esse efeito auto-catalítico de nitretação local aumenta a densidade de defeitos e sítios ativos na superfície do nanomaterial, característica crucial para catalisadores atuantes na hidrogenação e desidrogenação de carreadores LOHC.

Entretanto, a decomposição da fase nitretada observada a 800 °C evidencia que a janela cinético-termocinética para a obtenção de nitreto de tungstênio (WN_x) puro e nanocristalino é extremamente estreita. Essa observação corrobora achados recentes de Zang et al. (2026), que demonstraram que em reações gás-sólido envolvendo tungstênio, a preservação da fase nitretada ativa depende rigorosamente do tempo de permanência no patamar isotérmico e da taxa de resfriamento. Para a aplicação em sistemas LOHC — onde a estabilidade do nanomaterial em ciclos repetidos de carga e descarga de H_2 é indispensável —, a manutenção de alta área superficial e a integridade da fase nitretada (evitando a segregação de tungstênio metálico inerte) exigem um protocolo com menor tempo de residência a 700–750 °C e resfriamento rápido sob atmosfera inerte ou redutora (Muthukrishnan et al., 2025; Zang et al., 2026).

Portanto, os resultados comprovam que a seleção de precursores avançados associada ao controle fino dos parâmetros de síntese permite redefinir as janelas de processamento de nanomateriais funcionais, viabilizando rotas energeticamente eficientes, alinhadas aos princípios da química verde e altamente aplicáveis ao desenvolvimento de vetores limpos de estocagem de hidrogênio.

Conclusão

O estudo investigou a síntese sustentável e a evolução microestrutural de nanomateriais de nitreto de tungstênio (WN_x) via reação gás-sólido em reator de leito fixo, utilizando o paratungstato de amônia tetrahidratado como precursor molecular. O trabalho demonstrou a viabilidade técnica da rota proposta para a obtenção de fases nanocristalinas com elevado potencial de aplicação catalítica no armazenamento e liberação de hidrogênio (H_2) em Carreadores Orgânicos de Hidrogênio em Fase Líquida (LOHC).

A temperatura de 700 °C consolidou-se como a condição ótima para a nucleação da fase nitretada alvo (W_2N e $W_{2.00}$ cúbica), promovendo uma redução substancial da temperatura necessária para a reação em aproximadamente 300 °C quando comparada às rotas convencionais baseadas no uso de óxidos comerciais estáveis. Essa eficiência acentuada foi impulsionada pela decomposição térmica do precursor salino, que liberou amônia (NH_3) gasosa diretamente no leito reacional, atuando como um agente redutor e nitretante in situ de elevada reatividade. Essa sinergia reduziu de forma marcante as barreiras cinéticas de substituição do oxigênio por nitrogênio e favoreceu a formação de sítios ativos superficiais essenciais para os processos catalíticos.

Por outro lado, a elevação do tratamento térmico para 800 °C provocou a desnitretação e a redução da matriz sólida ao tungstênio metálico (W cúbico), evidenciando que a janela de estabilidade termodinâmica da fase nitretada é estreita e demanda um controle rigoroso do tempo de residência no patamar isotérmico. Por fim, o controle morfológico e a fase nanocristalina obtida a 700 °C consolidam uma plataforma catalítica promissora e de baixo custo em substituição aos metais nobres convencionais, como a platina e o paládio, contribuindo diretamente para o aumento da eficiência dos ciclos de hidrogenação e desidrogenação em sistemas LOHC. Os achados comprovam que a integração entre precursores moleculares e o controle fino do processamento gás-sólido viabiliza rotas alinhadas aos princípios da química verde e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7, 9 e 13) da ONU.

Referências

JAGGERS, C. H.; MICHEL, J. B.; AHMAD, S. R. Synthesis of high surface area transition metal nitrides and carbides. Journal of Materials Science, v. 25, n. 1, p. 629-634, 1990.

LIU, Y.; ZHANG, X.; LI, Y. Transition metal nitrides as noble-metal-free catalysts for energy conversion and storage. ACS Catalysis, v. 6, n. 4, p. 2652-2661, 2016.

MA, L.; ZENG, H. Nanostructured transition metal nitrides for hydrogen energy applications: Advances and prospects. Chemical Engineering Journal, v. 502, p. 151200, 2026.

MEDEIROS, F. F. Cinética e mecanismo de nitretação de óxidos de metais de transição em leito fixo. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

MUTHUKRISHNAN, A. et al. Advanced nanocatalysts for Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 190, p. 114000, 2025.

NIERMANN, M. et al. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC) – Assessment based on chemical engine and plant safety. International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, n. 13, p. 6631-6642, 2019.

OYAMA, S. T. Preparation and catalytic properties of transition metal carbided and nitrides. Catalysis Today, v. 15, n. 2, p. 179-200, 1992.

PREUSTER, P.; PAPP, C.; WASSERSCHEID, P. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs): Towards a hydrogen-free hydrogen economy. Acc. Chem. Res., v. 50, n. 1, p. 74-85, 2017.

SILVA, A. G. Síntese e caracterização de nitretos de metais de transição via reação gás-sólido a partir de precursores orgânicos. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SILVA, M. R. et al. Low-temperature synthesis of tungsten nitride nanoparticles using ammonium paratungstate. Materials Chemistry and Physics, v. 295, p. 127100, 2023.

ZANG, Q. et al. Thermal stability and phase transformation kinetics of tungsten nitrides in gas-solid reactions. Journal of Alloys and Compounds, v. 1010, p. 177200, 2026.

Anexos

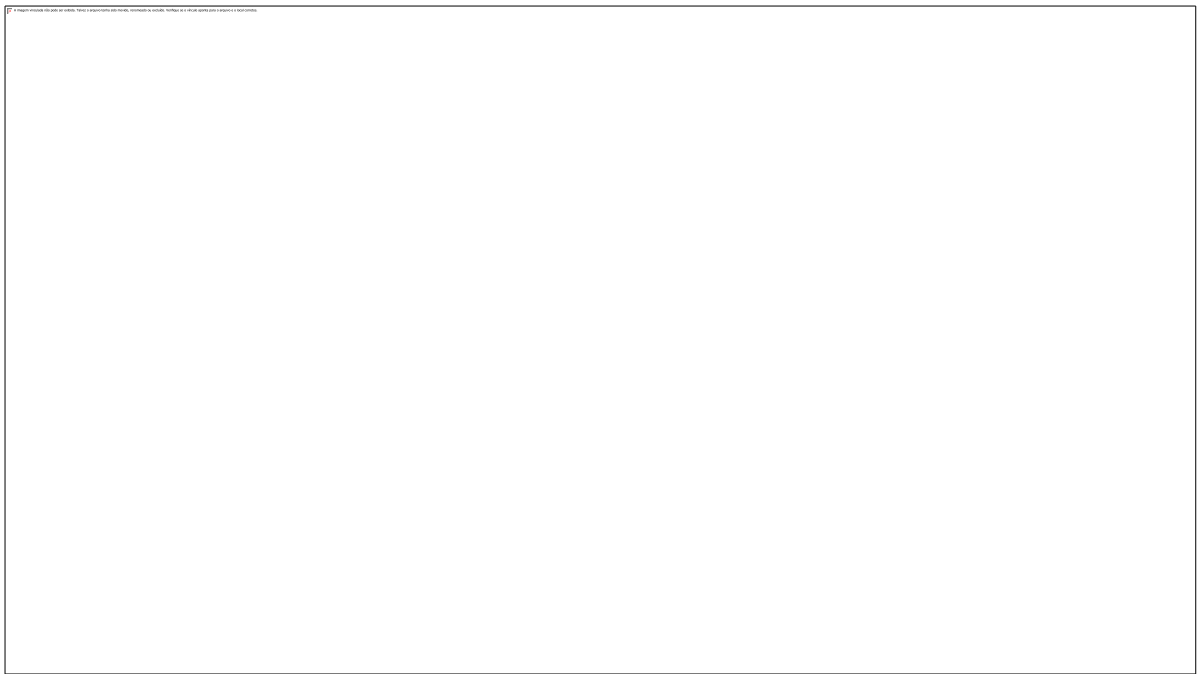


Figura 1 – Difratograma de raios X da amostra tratada a 600 °C com identificação das fases cristalinas WO2 monoclínica) e WO3 (ortorrômbica)



Figura 3 – Difratograma de raios X da amostra tratada a 800 °C com identificação das fases cristalinas de tungstênio metálico W(cúbica) e WO3 (monoclínica)

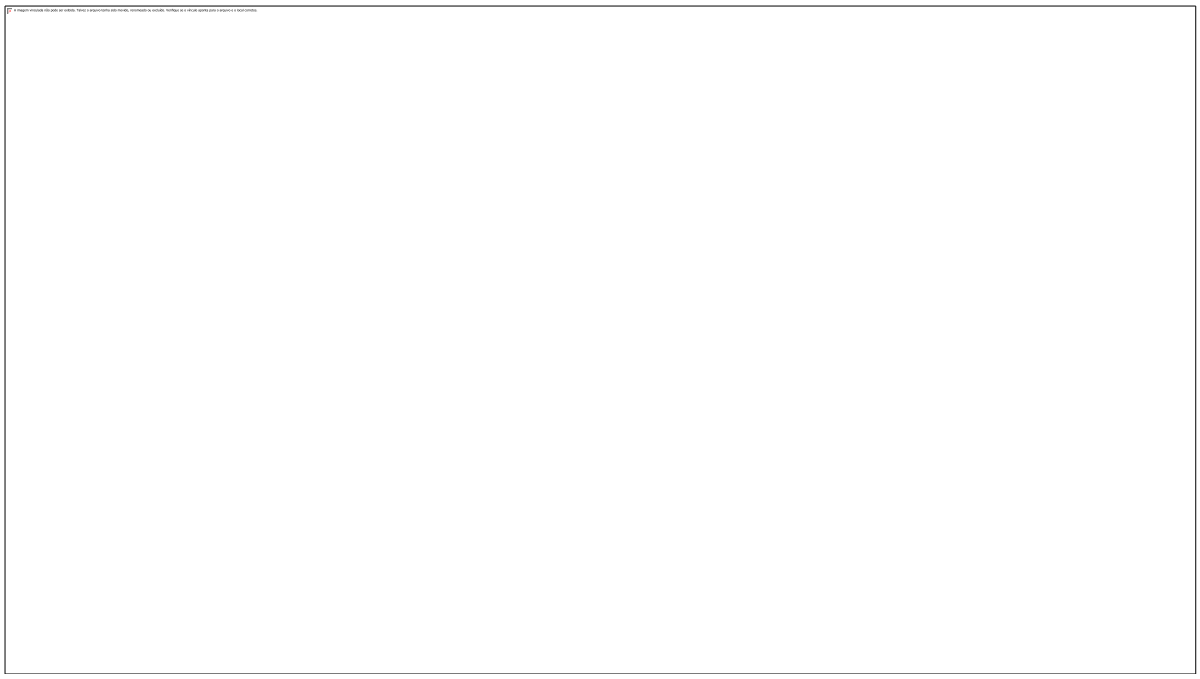


Figura 2 – Difratograma de raios X da amostra tratada a 700 °C com identificação das fases cristalinas $W2N / W{2.00} (cúbica) e WO3 (monoclínica residual)

CÓDIGO: ET0455

AUTOR: GUILHERME AVELINO DE LIMA MENDES

COAUTOR: DEBORA INGRID DA SILVA GONCALVES

COAUTOR: YASMIM ILIADA CURY RODRIGUES

COAUTOR: DAVIDSON NUNES DE OLIVEIRA

COAUTOR: VICTOR DANIEL BEVENUTO DE MEDEIROS

ORIENTADOR: FILIPE MARTEL DE MAGALHAES BORGES

TÍTULO: Um olhar sobre a jornada da perovskita como catalisador ambiental

Resumo

O trabalho investigou a obtenção da perovskita dupla La1,5Ca0,5CoMnO6 pelo método de combustão com uréia rica, seguida de calcinação a 800ºC/6h visando sua aplicação como catalisador ambiental. A caracterização por DRX indicou a formação da fase perovskita, com picos próximos de 33º, 42º, 47º, 58º, 69º, embora a baixa intensidade e o alargamento de algumas reflexões surgiram possível desordem estrutural ou cristalização incompleta, sendo recomendadas análises complementares, como refinamento de Rietveld. As análises por MEV revelaram aglomerados porosos e regiões com heterogeneidade morfológica, indicando que as condições de síntese e calcinação influenciaram significativamente a microestrutura do material. De modo geral, o material apresentou características promissoras para aplicações catalíticas ambientais, embora sejam necessários estudos adicionais para otimizar sua estrutura, estabilidade e desempenho. A proposta está alinhada com a ODS 3 – Saúde e bem-estar, ODS 9 – Indústria, Inovação e infraestrutura e ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima.

Palavras-chave: Combustão. Catálise. COVs. Saúde humana. Perovskita Dupla.

TITLE: A look at the journey of perovskite as an environmental catalyst

Abstract

This study investigated the synthesis of the double perovskite La1,5Ca0,5CoMnO6 using a urea-rich combustion method, followed by calcination at 800°C for 6 hours, with the aim of applying it as an environmental catalyst. XRD characterization indicated the formation of the perovskite phase, with peaks near 33°, 42°, 47°, 58°, and 69°;

however, the low intensity and broadening of some reflections suggested possible structural disorder or incomplete crystallization, warranting further analysis such as Rietveld refinement. SEM analysis revealed porous agglomerates and regions of morphological heterogeneity, indicating that the synthesis and calcination conditions significantly influenced the material's microstructure. Overall, the material exhibited promising characteristics for environmental catalytic applications, although further studies are required to optimize its structure, stability, and performance. This proposal aligns with SDG - 3 (Good Health and Well-being), SDG - 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), and SDG - 13 (Climate Action).

Keywords: Combustion. Cathalysis. VOCs. Human health. Double perovskite.

Introdução

O ritmo e a expansão acelerada das atividades industriais desequilibraram a qualidade do ar, gerando uma multiplicidade de poluentes, como os compostos orgânicos voláteis (COVs), bem como gases de efeito estufa tal qual o metano, representando um conjunto de emissões prejudiciais à saúde e ao ambiente, transformando a poluição atmosférica em um dos maiores desafios da atualidade, de modo que se exigiu formas de mitigação através de soluções catalíticas versáteis, eficientes, duráveis e de baixo custo (KAMAL, 2019). Catalisadores de referência à base de metais nobres como platina, paládio e ródio oferecem desempenho excepcional, mas apresentam vulnerabilidades, como a escassez e o alto custo. Dessa forma, intensificou-se a busca por alternativas economicamente viáveis capazes de igualar esse desempenho, tornando-se um dos objetivos fundamentais da catálise ambiental. (WU, 2023; ZHOU, 2023).

Diante disso, pesquisadores como Rudolf J. H. Voorhoeve, desde a década de 70, foram os primeiros a propor a perovskita como materiais para a aplicação em catálise automotiva substituindo metais nobres tais como Platina(Pt) e Paládio(Pd). Assim, surgem os óxidos de perovskita para a conversão de gases poluentes, que tem atraído atenção devido à sua capacidade de estabilizar estados de oxidação elevados e voláteis, sendo caracterizados pela sua fórmula geral ABO3, em que o sítio A é tradicionalmente ocupado por um cátion de terra rara ou metal alcalino terroso e o sítio B por um metal de transição, essa configuração habilita o desenvolvimento de vacâncias de oxigênio, sustentando substituições composicionais e garantindo estabilidade estrutural. Contudo, a estrutura usual da perovskita possui uma limitação, pois o desempenho catalítico é regulado por um único centro de metal de transição cujas propriedades não podem ser otimizadas de forma independente(ROOZBAHANI, 2022). Perovskitas anteriores com substituições no sítio A, como também nos sítios A e B, também foram estudadas com essa finalidade de conversão (TONIOLO, 2016). Nesse contexto, as perovskitas duplas, de fórmula A2BB'O6, podem atuar de forma a ampliar a capacidade de ajuste ao introduzir dois cátions distintos no sítio B, otimizando a estabilidade química, assim como o desempenho catalítico na oxidação do metano. Esta otimização estrutural decorre da flexibilidade das perovskitas duplas em adotar diferentes ordenações catiônicas, dependendo estritamente das diferenças de valência e do raio iônico entre os materiais B e B’. (DAI, 2025). Singularmente, o composto La2-xCaxCoMnO6, combina cobalto e manganês em uma estrutura coordenada por lantânio, resultando em um material moldado pela presença de múltiplos estados de oxidação, Co2+/Co3+ e Mn3+/Mn4+, assegurando uma renovação eficiente de oxigênio a temperaturas bem

inferiores às exigidas por perovskitas monometálicas, promovendo a formação abundante de vacâncias de oxigênio, favorecendo assim a oxidação catalítica e a conversão dos COVs. Sendo importante destacar que o desenvolvimento e a regulação desses defeitos estruturais são dependentes do tratamento térmico e do método de síntese empregado. Condições específicas de preparação, como a temperatura de calcinação modificam não apenas a cristalinidade, mas também o grau de ordenação dos cátions e o estado de oxidação das espécies metálicas na superfície. (DUAN, 2023). Este trabalho tem como objetivo abordar o estudo inicial do conhecimento sobre o La2-xCaxCoMnO6 como material catalítico para aplicações ambientais, abrangendo respectivamente a oxidação total e parcial de COVs e do gás metano. Discutimos os fatores estruturais que gerenciam o desempenho catalítico, examinando o impacto da estratégia de síntese por combustão e das caracterizações pós-tratamento. Ao firmar essas informações, buscamos oferecer um panorama da capacidade do composto La2-xCaxCoMnO6 no âmbito dos catalisadores ambientais de alto desempenho, baixo custo e livres de metais nobres.

Metodologia

A síntese da amostra de perovskita do tipo La2-xCaxCoMnO6 foi realizada através do método de combustão, utilizando como combustível a ureia rica. Os precursores utilizados foram nitrato de lantânio hexahidratado [La(NO3)3.6H2O] (Vetec, 99%), nitrato de cobaltohexahidratado [Co(NO3)2.6H2O] (Vetec, 98%), cloreto de manganês tetrahidratado [MnCl2.4H2O] (Vetec, 99%) e ureia rica. Os reagentes foram adicionados em um béquer contendo água destilada e aquecidos sob agitação magnética por 30 min a temperatura de 90ºC até a completa homogeneização. A solução foi sucedida através do método de combustão a uma temperatura de 300ºC em um recipiente metálico para remoção de matéria orgânica e resíduos, até a obtenção de um pó precursor, que logo após foi macerado manualmente em almofariz. Em seguida, o pó precursor foi caracterizado por difração de raios-x (DRX) em equipamento Shimadzu XRD-6000 utilizando radiação Cu-Kα e comprimento de onda λ = 1,5406 Å, os difratogramas foram obtidos entre 10° e 80° em 2θ, com velocidade de varredura de 1° min^{-1}. Foi utilizado para análise da fase o banco de dados Inorganic Crystal Structure Database (ICSD), assim como foi realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS) com aumento de 500× e 5000× em equipamento Hitachi TM3000. A análise de DRX após a etapa de combustão é crucial para identificar o desenvolvimento inicial da fase perovskita, o que orienta e assegura o potencial do material, avaliando a possibilidade de suceder com o tratamento térmico. Do mesmo modo, a observação preliminar mediante MEV procura aferir a morfologia primária, elucidando o grau de aglomeração e porosidade do pó bruto (ROOZBAHANI, 2022).

Em seguida, com as propriedades do precursor comprovadas, a amostra foi calcinada em forno tipo mufla a 800ºC/6h. Após a calcinação final, novas análises de DRX foram realizadas para assegurar a formação da fase perovskita desejada e verificar o grau de cristalinidade. Buscando estudar a morfologia conclusiva da amostra, foi realizado novamente o MEV, permitindo avaliar aspectos como, a forma, tamanho, porosidade e aglomeração das partículas, sendo esses elementos necessários para determinar a

influência morfológica no desempenho catalítico de conversão superficial dos gases (SHARMA, 2024).

Resultados e Discussões

O difratograma de raios X da amostra de La2-xCaxCoMnO6 demonstrou na Figura 1 que o pico característico da estrutura perovskita que ocorre na faixa 2θ = 30º-35º não foi observado, indicando que a fase perovskita ainda não se encontrava plenamente formada (SAHOO, 2019). Os produtos da combustão frequentemente consistem em uma fase amorfa entreposta por nano domínios cristalinos de carbonatos e oxicarbonatos de lantânio, que não se decompõem facilmente com o aumento da temperatura, e cuja presença retarda a cristalização completa da perovskita. Isso indica que, em rotas de combustão ricas em ureia, o processo de combustão tende a produzir predominantemente fases intermediárias. (BAYODE, 2024). A figura B apresenta a análise de difração de raios X da amostra de La2-xCaxCoMnO6, sendo sintetizada pela rota de combustão e submetida à calcinação de 800ºC por 6h (YUNIDA, 2020). O estudo do padrão de difração corresponde às cartas cristalográficas características da perovskita dupla do tipo La1,5Ca0,5CoMnO6, acordando com ICSD-19785. Ao realizar uma análise, foram constatados 5 picos que corroboram com a carta observada na Figura 2, sendo os picos que mais se aproximam 2θ ≈ 33º, 42º, 47º, 58º, 69º. (SAHOO, 2019). O pico de maior intensidade do material é concentrado em 2θ≈ 33º sob uma faixa de 10º-80º, sendo o comportamento característico de compostos desta família, o que sugere a cristalização da estrutura da perovskita dupla nas condições de síntese adotadas (SHEREEF, 2023). Contudo, o difratograma revela que o pico principal e os picos secundários apontam menor intensidade e maior alargamento, indicando possível amorfização ou cristalização incompleta, esse comportamento pode estar relacionado ao grau de organização estrutural do composto, como a desordem catiônica entre o Co2+ e o Mn4+ e a baixa temperatura de calcinação empregada. (SHEREEF, 2023). Dessa forma, embora as principais reflexões sejam visualmente compatíveis com a fase perovskita, a confirmação requer análises complementares como o refinamento de Rietveld para confirmação das fases e assegurar a obtenção do material desejado. A análise da amostra $La_{2-x}Ca_xCoMnO_6$ com calcinação e sem calcinação foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme apresentado na Figura 3 nas ampliações (a) 10000× e (b) 30000×. Observou-se uma morfologia caracterizada pela formação de aglomerados atípicos e superfície predominantemente rugosa. Verifica-se ainda a coexistência de regiões espessas com áreas de aspecto mais cavado e poroso, indicando uma distribuição morfológica pouco uniforme após a etapa da síntese de combustão. Esse comportamento é compatível com as características do método de síntese adotado(SHEREFF, 2023). A presença de Cálcio (Ca) na amostra sem calcinação foi constatada a partir da análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS), reforçando a presença do elemento na composição após a combustão. De acordo com as micrografias de MEV da amostra calcinada conforme a Figura 4, constatou-se nas figuras a) 500× e b) 5000× a formação de aglomerações porosas e relativamente homogêneas, características que são resultado direto da rápida liberação dos gases derivados da decomposição térmica das fontes orgânicas do método de síntese e dos precursores metálicos, impedindo a concentração das partículas e resultando em uma área superficial específica maior, sendo um aspecto regular de pós obtidos através de síntese via rota de combustão. Trata-se de uma particularidade com efeito direto sobre o

desempenho catalítico do material, porque maior porosidade resulta em área superficial BET mais elevada e em melhor eficiência na conversão de gases tóxicos em menos nocivos, a extensa rede de poros facilita a difusão e potencializa a adsorção de gases tóxicos nos sítios metálicos (ROOZBAHANI, 2022). Entretanto, varreduras em outras regiões da mesma amostra revelaram uma significativa heterogeneidade morfológica. Nestas áreas, como a da figura c) 5000× a microestrutura difere da fase perovskita usualmente observada, adotando um aspecto de "lâminas" ou "flor". A coexistência dessas morfologias distintas pode indicar que o calor não se distribuiu uniformemente ou houve uma distribuição heterogênea do combustível durante a fase da queima. Essa configuração microestrutural coincide diretamente com as observações do DRX referentes à provável formação de fases secundárias, indicando que a calcinação a 800ºC possa ter formado uma estrutura multifásica (SHEREEF, 2023).

Conclusão

O presente estudo procurou demonstrar a viabilidade da obtenção da perovskita dupla do tipo La1,5Ca0,5CoMnO6 por meio do método de síntese por combustão utilizando ureia, seguida de calcinação a 800ºC/6h. Assim, foram confirmados a formaçãoda fase cristalina característica e picos equivalentes ao desta família de materiais perovskita, embora os picos de menor intensidade e o perfil de alargamento dos reflexos principais possam indicar possível desordem estrutural, cristalização incompleta, zonas de menor ordenamento catiônico e provável formação de fases secundárias que requerem maior investigação. Na análise microestrutural por MEV notou-se uma heterogeneidade morfológica na amostra. Foram identificadas regiões caracterizadas por aglomerados altamente porosos, rugosos e relativamente homogêneos. Contudo, a observação da coexistência com áreas de morfologia incomum homólogas a "lâminas" ou "flor" corroborou com a análise da presença de heterogeneidade estrutural. Assim, conclui-se que a síntese do material calcinado a 800ºC apresenta características favoráveis à catálise ambiental, porém, futuros estudos como a calcinação em temperaturas mais elevadas são necessários para melhor compreensão do catalisador, visando garantir maior reprodutibilidade e avanços na eficiência da mitigação de poluentes.

Referências

MUHAMMAD SHAHZAD KAMAL, SHAIKH A. RAZZAK, MOHAMMAD M. HOSSAIN. Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs) – A review. Atmospheric Environment, Volume 140, p. 117-134, 2016. Disponivel em: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.031. Acesso em: 2 jul. 2026.

MUDI WU, MINGWU TAN, WENGUO XIANG, SHIYI CHEN. Surface optimization of double perovskite oxide La2NiFeO6 for toluene catalytic oxidation through control of cation non-stoichiometry.Surfaces and Interfaces, Volume 43, Part A, 103517, 2023,. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103517. Acesso em: 29 ago. 2026.

LILONG ZHOU, PENG YIN, CHUANSHI TAN, ZHENGJIE LI, EMMA LOVELL, HONGJIE LIU, RUNJING LIU, JIMMY YUN. Controlled double perovskites for the

efficient catalytic combustion of Cl containing VOCs. Applied Catalysis A: General, Volume 666, 2023, 119439, ISSN 0926-860X, Disponivel em: https://doi.org/10.1016/j.apcata.2023.119439. Acesso em: 29 ago. 2026.

VOORHOEVE, R.J.H., REMEIKA, J.P. AND TRIMBLE, L.E. Defect chemistry and catalysis in oxidation and reduction over perovskite-type oxides. Annals of the New York Academy of Sciences, 272: 3-21, 1976. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1976.tb34221.x. Acesso em: 29 ago. 2026.

ROOZBAHANI, H., MAGHSOODI, S., RAEI, B.Effects of catalyst preparation methods on the performance of La2MMnO6 (M=Co, Ni) double perovskites in catalytic combustion of propane. Korean J. Chem. Eng. 39, 586–595, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11814-021-0930-1. Acesso em: 29 ago. 2026.

TONIOLO, FABIO SOUZA; SCHMAL, MARTIN. Improvement of Catalytic Performance of Perovskites by Partial Substitution of Cations and Supporting on High Surface Area Materials. In: Perovskite Materials – Synthesis, Characterisation, Properties and Applications. IntechOpen, 2016. DOI: 10.5772/61279.

HUAMING DAI, YI YANG, HONGTING WANG. Synergistic enhancement of methane partial oxidation in heat-recirculating reactor with the composite catalytic effect of Co-based double perovskite and CeO2. Process Safety and Environmental Protection, Volume 193, 2025, Pages 533-549, ISSN 0957-5820. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.034. Acesso em: 29 ago. 2026.

DUAN, A., WANG, T., WU, S. From waste to wealth: a cellulose-based fibrous membrane from recycled cigarettes supported with dual perovskite for formaldehyde degradation at room temperature. Cellulose 30, 5795–5809 (2023). Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10570-023-05251-3. Acesso em: 29 ago. 2026.

FIZ KARLSRUHE. Inorganic Crystal Structure Database (ICSD): collection code 19785. Karlsruhe: FIZ Karlsruhe, [s.d.]. Disponível em: https://icsd.products.fiz-karlsruhe.de/en. Acesso em: 29 ago. 2026.

SHARMA, R.; HOODA, N.; HOODA, A.; KHASA, S. Structural, dielectric and magnetic study of double perovskite La_2CoMnO_6. Physica B: Condensed Matter, v. 673, p. 415473, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415473. Acesso em: 29 ago. 2026.

AJIBOLA A. BAYODE, ODUNAYO T. ORE, ESTHER A. NNAMANI, BABAJIDE SOTUNDE, DANIEL T. KOKO, EMMANUEL I. UNUABONAH, BRIGITTE HELMREICH, MARTINS O. OMOROGIE. Perovskite Oxides: Syntheses and Perspectives on Their Application for Nitrate Reduction. ACS Omega 7 May 2024; 9 (18): 19770–19785. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01487. Acesso em: 29 ago. 2026.

YUNIDA, D TRIYONO. The influence of calcination temperature on the structural properties of La2FeMnO6 double perovskite materials. 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 902 012027. Disponível em: 10.1088/1757-899X/902/1/012027. Acesso em: 29 ago. 2026.

SAHOO, R. C.; DAS, S.; NATH, T. K. Antiferromagnetic ordering in 25% Ca doped antisite-disordered ferromagnetic La_2CoMnO_6 double perovskite. Materials Today: Proceedings, v. 11, p. 724-728, 2019. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.03.034. Acesso em: 29 ago. 2026.

A. SHEREEF, P.A. ALEENA, JIBI KUNJUMON, AYONA K. JOSE, SUSMI ANNA THOMAS, MERIN TOMY, T.S. XAVIER, SHAMIMA HUSSAIN, D. SAJAN. Third order nonlinear optical properties and electrochemical performance of La2CoMnO6 double perovskite. Materials Science and Engineering: B, Volume 289, 2023, 116262, ISSN 0921-5107. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116262. Acesso em: 29 ago. 2026.

Anexos

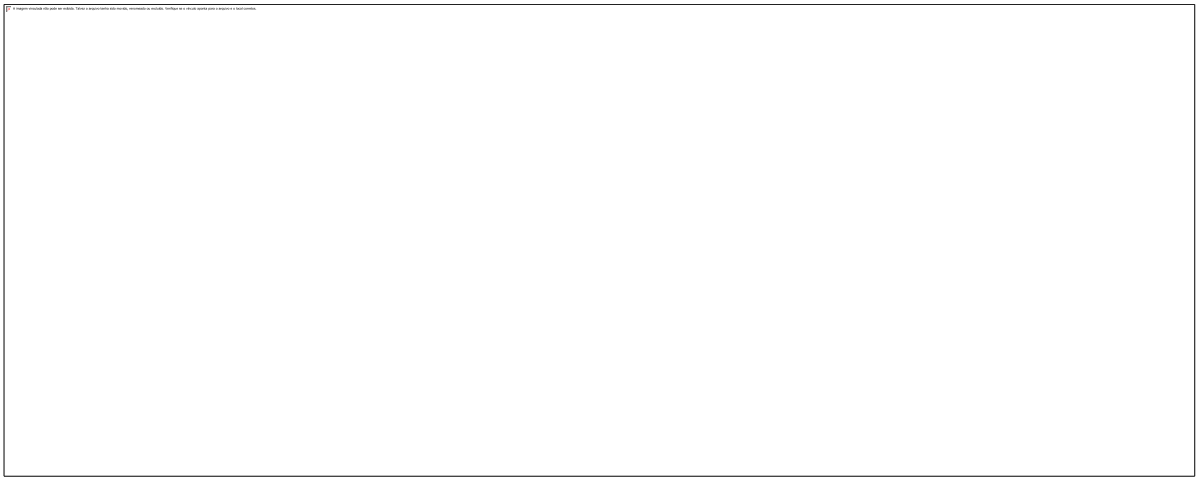


Figura 1 - Difratogramas de raios X da amostra de La2-xCaXCoMnO6 sem calcinação (a) e com calcinação a 800ºC/6h (b). Fonte: Autoria própria.

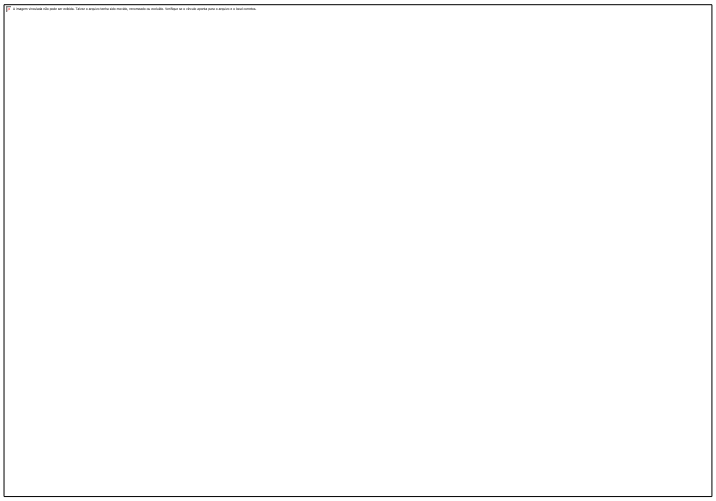


Figura 2: Difratogramas de raios X da amostra de La1,5Ca0,5CoMnO6. Fonte: Inorganic Crystal Structure Database (ICSD), registro ICSD-19785 (FIZ KARLSRUHE, [s.d.]).

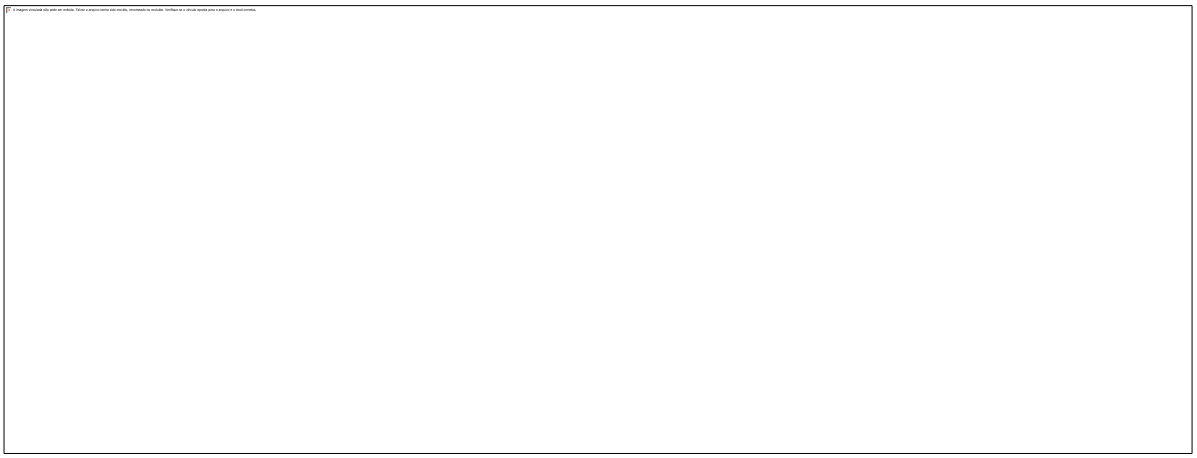


Figura 3 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da perovskita dupla La1,5Ca0,5CoMnO6 sem calcinação nas ampliações de (a) 10000×, (b) 30000×. Fonte: Autoria própria.



Figura 4 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da perovskita dupla La1,5Ca0,5CoMnO6 calcinada a 800 °C nas ampliações de (a) 500×, (b) 5000× e (c) 5000×. Fonte: Autoria própria.

CÓDIGO: ET0532

AUTOR: MATHEUS AUGUSTO DE OLIVEIRA BEZERRA

ORIENTADOR: MARCELO PRATA VIDAL

TÍTULO: Estudo quantitativo de parâmetros físico-químicos de méis comerciais do Rio Grande do Norte

Resumo

O presente estudo avalia a qualidade físico-química e o teor de 5- hidroximetilfurfural (HMF) em méis comerciais no Rio Grande do Norte, suprindo a necessidade de dados locais. Foram analisadas amostras através de parâmetros como umidade, pH, acidez, açúcares e condutividade elétrica. O HMF foi determinado pelo método de White (UV-Vis). Sendo assim, os dados foram estatisticamente analisados (ANOVA/teste t), a fim de criar uma base inédita para fortalecer a apicultura potiguar.

Palavras-chave: Hidroximetilfurfural; Mel; Espectrofotometria UV-Vis; Mel Tropical

TITLE: Physicochemical quality of commercial honey: Determination of regulatory parameters and quantification of 5-hydroxymethylfurfural

Abstract

This study evaluates the physicochemical quality and 5-hydroxymethylfurfural (HMF) content in commercial honey from Rio Grande do Norte, addressing the lack of local data. Samples were analyzed through parameters such as moisture, pH, acidity, sugars, and electrical conductivity. HMF levels were determined using the White method (UV-Vis). The data were statistically analyzed (ANOVA/t-test) to establish an unprecedented baseline to support and strengthen regional beekeeping.

Keywords: Hydroxymethylfurfural; Honey; UV-Vis Spectrophotometry; Tropical Honey

Introdução

O mel é considerado um produto natural elaborado pelas abelhas a partir do néctar floral ou exsudatos de plantas, transformado por ação enzimática e armazenado nos favos. Sua composição se dá majoritariamente por frutose e glicose, além de conter vitaminas,

minerais, ácidos orgânicos, enzimas e compostos fenólicos (WHITE, 1975; ALVES et al., 2018). Essa composição confere ao mel propriedades funcionais, como ação antimicrobiana e antioxidante, sendo amplamente valorizado na alimentação e em aplicações terapêuticas.

Mundialmente, o mel é considerado uma excelente fonte de carboidratos devido à sua composição predominantemente constituída por frutose e glicose. A nível global, a maior parte da produção concentra-se no continente asiático, com a China na liderança mundial, seguida pela União Europeia (COMISSÃO EUROPEIA, 2024). Além de suas propriedades nutricionais, o mel desempenha papel fundamental na segurança alimentar e atua como instrumento de geração de renda em comunidades remotas situadas em países como Etiópia e República Centro-Africana (RCA).

No Brasil, a apicultura representa uma atividade relevante, especialmente nas regiões semiáridas. No estado do Rio Grande do Norte, a produção alcançou 887 toneladas no ano de 2023, envolvendo cerca de 1.200 apicultores, conforme dados do IBGE (2023). Essa produção encontra-se fortemente vinculada a programas de compras governamentais, feiras agroecológicas e ao comércio internacional (SEBRAE RN, 2021), posicionando o estado na décima colocação do ranking nacional de produção apícola (IBGE/PPM, 2023).

A qualidade do mel comercializado depende estritamente do cumprimento de parâmetros estabelecidos pela legislação vigente, em especial a Instrução Normativa nº 11/2000 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que regula critérios físico-químicos como umidade, pH, acidez, condutividade elétrica e teor de sólidos solúveis.

Entre os principais parâmetros de avaliação da qualidade e integridade do mel destaca-se o 5-hidroximetilfurfural (HMF), composto formado pela degradação térmica de açúcares redutores. O teor de HMF eleva-se progressivamente com o tempo de armazenamento e a exposição ao calor, constituindo um marcador sensível de envelhecimento e adulteração. A legislação brasileira estabelece o limite máximo de 60 mg/kg para méis destinados ao consumo humano.

Diante do cenário de relevância do mel para a segurança nutricional e a sustentabilidade econômica, o Brasil assume papel de destaque no setor. Como um dos produtores expressivos do país, o Rio Grande do Norte demanda análises físico-químicas contínuas para assegurar a conformidade e a qualidade de seus produtos. Contudo, apesar do volume produzido, ainda são escassos os estudos técnico-científicos voltados à caracterização analítica dos méis potiguares.

O presente trabalho propõe a realização de um estudo analítico sobre méis comerciais potiguares por meio de metodologias oficiais, avaliando parâmetros físico-químicos (umidade, pH, acidez, condutividade elétrica e açúcares), quantificando o HMF por espectrofotometria UV-Vis (método de White) e comparando os resultados obtidos com os limites normativos da Instrução Normativa nº 11/2000 do MAPA, de modo a consolidar uma base de dados técnicos sobre a qualidade da apicultura regional.

Metodologia

Com o intuito de ampliar a representatividade amostral do estudo, foram adquiridas sete amostras de méis comerciais em feiras, mercados e cooperativas da Região Metropolitana de Natal e de municípios do interior, garantindo assim a diversidade de marcas, floradas e estados físicos (fluido ou cristalizado). As sete amostras foram segmentadas em distintas origens florais: Jurema-preta, Marmeleiro, Angico, Aroeira, Cipó-uva, Velame e Florada de Cajueiro. Para assegurar a integridade do produto e a confiabilidade analítica, as amostras foram armazenadas em frascos âmbar sob temperatura controlada (-25 °C) até o momento das análises. A fim de minimizar variações experimentais e permitir o cálculo do desvio-padrão, todos os ensaios foram conduzidos em triplicata.

As determinações físico-químicas seguiram os protocolos oficiais preconizados pelo Codex Alimentarius (2001) e pela Instrução Normativa nº 11/2000 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). A umidade foi mensurada por refratometria digital, com posterior conversão por tabela padrão de Chataway, enquanto o pH foi determinado por leitura direta em pHmetro devidamente calibrado. A acidez livre foi quantificada por titulometria de neutralização com solução de NaOH 0,05 mol/L, com resultados expressos em mEq/kg. A condutividade elétrica foi aferida a 20 °C por meio de condutivímetro de bancada, expressa em µS/cm.

O teor de sólidos solúveis totais (°Brix) foi obtido via refratometria digital. A cor foi determinada por espectrofotometria no comprimento de onda de 560 nm, com conversão dos valores de absorbância para a escala Pfund. Os teores de açúcares redutores e sacarose aparente foram quantificados pelo método clássico de Lane-Eynon, expressos em percentual (%).

Os dados analíticos gerados foram compilados em planilhas eletrônicas e submetidos à análise estatística no ambiente computacional R. Realizou-se a análise estatística descritiva para a determinação de média, desvio-padrão e coeficiente de variação (CV).

Resultados e Discussões

A caracterização analítica dos méis comercializados no Rio Grande do Norte permitiu traçar um diagnóstico preciso sobre a qualidade dos produtos. Os resultados obtidos a partir da quantificação espectrofotométrica do 5-hidroximetilfurfural (HMF) e dos ensaios físico-químicos encontram-se sumarizados na Tabela 1.

Os teores de umidade observados nas sete amostras apresentaram variação de 16,4 ± 0,2% (Mel 6 – Velame) a 19,1 ± 0,4% (Mel 5 – Cipó-uva). Ao confrontar esses dados experimentais com os limites máximos estipulados pela Instrução Normativa nº 11/2000 do MAPA e pelo padrão internacional do Codex Alimentarius, os quais estabelecem o limite de 20% para méis florais, constata-se que todas as amostras avaliadas encontram-se em estrita conformidade regulamentar.

Os valores de pH determinados exibiram variação de 3,73 ± 0,03 (Mel 1 – Jurema-preta) até 5,01 ± 0,05 (Mel 4 – Aroeira). Portanto, todas as amostras estão em conformidade, uma vez que não existem limites numéricos compulsórios na IN nº 11/2000 (MAPA) e no Codex Alimentarius.

No que concerne à acidez livre, as amostras analisadas apresentaram oscilação significativa, compreendendo um intervalo de 24,6 ± 0,5 meq/kg (Mel 1 – Jurema-preta) até 61,2 ± 1,5 meq/kg (Mel 7 – Florada de Cajueiro). Ao confrontar os dados obtidos com o limite regulatório de 50 meq/kg estabelecido em âmbito nacional pela Instrução Normativa nº 11/2000 do MAPA e pelo Codex Alimentarius (Codex Stan 12-1981), constatou-se que as amostras 1 a 6 encontram-se em perfeita conformidade legal. Por outro lado, a amostra 7 apresentou nível de 61,2 ± 1,5 meq/kg, excedendo o limite permitido e acarretando restrição comercial para o mercado nacional e internacional.

Os ensaios de condutividade elétrica revelaram variação acentuada entre as amostras, flutuando de 0,22 ± 0,01 mS/cm (Mel 1 – Jurema-preta) a 1,11 ± 0,05 mS/cm (Mel 6 – Velame). Segundo a IN nº 11/2000 do MAPA e o Codex Alimentarius, o limite estabelecido para méis de origem floral é de 0,80 mS/cm. As amostras 1, 2, 3, 5 e 7 apresentaram valores em plena conformidade regulamentar, enquanto as amostras 4 e 6 ultrapassaram os limites normativos. O resultado dessas amostras não deve ser interpretado como indicativo de não conformidade qualitativa: de acordo com Santos et al. (2014), em estudos realizados no semiárido potiguar, méis derivados de espécies arbóreas e arbustivas da Caatinga frequentemente apresentam valores acima do limite regulamentado. Ainda segundo Santos et al. (2014), esse fenômeno quimiométrico fundamenta-se na fisiologia vegetal adaptada dessas espécies diante do estresse hídrico severo e das características edafoclimáticas da região. Sob a perspectiva humanitária e de intervenção nutricional em países em desenvolvimento, como a República Centro-Africana (RCA), a elevada condutividade elétrica das amostras 4 (Aroeira) e 6 (Velame) transforma um aparente entrave regulatório em um diferencial funcional de alto valor. O fornecimento de méis com alta densidade mineral atua não apenas como vetor calórico de rápida absorção, mas também como repositor hidroeletrolítico natural complementar. Como esses méis possuem umidade dentro dos parâmetros definidos, atendem aos critérios de segurança e estabilidade biológica da FAO (2009), beneficiando mercados com elevado consumo per capita, como a RCA (FAO, 2019).

No que tange à determinação dos sólidos solúveis totais, expressa em graus Brix (°Brix), revelou-se alta concentração nas sete amostras, com valores situados no intervalo de 78,8 ± 0,4 °Brix (Mel 5 – Cipó-uva) a 81,7 ± 0,3 °Brix (Mel 6 – Velame). Observou-se correlação inversa e linear entre os índices de °Brix e os percentuais de umidade: a amostra de Velame (Mel 6), por exemplo, apresentou a menor taxa de umidade (16,4%) e o maior percentual de sólidos solúveis (81,7 °Brix). Esses valores de umidade e sólidos solúveis totais corroboram a aptidão dos méis potiguares para o atendimento a critérios mínimos exigidos no transporte transoceânico de longa distância (BOGDANOV; MARTIN; LÜLLMANN, 1997; FAO, 2009).

A quantificação do 5-hidroximetilfurfural (HMF) consolidou-se como o principal indicador de integridade e frescor das amostras, revelando intervalo de valores entre 5,9 ± 0,4 mg/kg (Mel 1 – Jurema-preta) e 57,4 ± 2,1 mg/kg (Mel 7 – Florada de Cajueiro). No Brasil, a IN nº 11/2000 estabelece o teto de 60 mg/kg para a comercialização como mel de mesa. No mercado internacional, o Codex Alimentarius e as diretrizes da FAO

(2009) preconizam o limite padrão de 40 mg/kg, admitindo até 80 mg/kg para méis procedentes de regiões de clima tropical. Dessa forma, 100% das amostras encontram-se em plena conformidade legal para o consumo humano perante as normas vigentes. Contudo, para fins de logística de exportação e transporte prolongado, recomenda-se priorizar as amostras 1 a 6, visto que a amostra 7, por apresentar valor inicial mais elevado, possui margem reduzida para oscilações térmicas antes de atingir o teto de 80 mg/kg.

Conclusão

A caracterização físico-química dos méis produzidos no Rio Grande do Norte revelou um perfil analítico de excelência, atendendo aos parâmetros regulatórios vigentes e agregando uma ampla variedade de origens florais regionais. Praticamente todos os critérios foram cumpridos em conformidade com as diretrizes da Instrução Normativa nº 11/2000 do MAPA e do Codex Alimentarius, com ressalva pontual para a amostra 7 (Florada de Cajueiro), que, apesar de apresentar acidez livre acima do limite normativo, manteve os demais índices físico-químicos em patamares adequados.

O estudo atingiu seu objetivo primordial ao estruturar uma base de dados analítica sobre a qualidade e os requisitos de conformidade do mel potiguar, consolidando uma ferramenta estratégica para o fortalecimento e a valorização da apicultura regional. A organização dessas informações evidencia que a inserção competitiva no mercado internacional depende da capacidade contínua de mapeamento, padronização e certificação físico-química. Além disso, a estabilidade e a riqueza mineral identificadas nos méis do semiárido reforçam seu potencial de aplicação e fornecimento humanitário a países de elevado consumo per capita, como a República Centro-Africana, aliando viabilidade comercial e impacto social.

Referências

AGÊNCIA SEBRAE DE NOTÍCIAS RN. Projeto ‘RN Exporta Mais’ vai fomentar acesso ao comércio exterior. Natal: SEBRAE RN, 5 fev. 2021. Disponível em: https://rn.agenciasebrae.com.br/arquivo/projeto-rnexporta-mais-vai-fomentar-acesso-ao-comercioexterior/. Acesso em: 16 maio 2026.

ALJADI, A. M.; KAMARUDDIN, M. Y. Evaluation of the phenolic contents and antioxidant capacities of two Malaysian floral honeys. Food Chemistry, v. 85, n. 4, p. 513–518, 2004.

BERETTA, G. et al. Comparative evaluation of antioxidant activity of honeys of different floral origin with emphasis on Manuka honey. Food Chemistry, v. 91, n. 3, p. 349–354, 2005.

BOGDANOV, S.; MARTIN, P.; LÜLLMANN, C. Harmonised methods of the International Honey Commission. Apidologie, v. 28, n. 4, p. 211–229, 1997. Disponível em: https://doi.org/10.1051/apido:19970406. Acesso em: 13 dez. 2025.

BRADBEAR, Nicola. Definition and uses of honey. In: BRADBEAR, Nicola. Bees and their role in forest livelihoods: a guide to the services provided by bees and the sustainable harvesting, processing and marketing of their products. Rome: FAO, 2009. cap. 9, p. 81–88. (Non-Wood Forest Products, 19). Disponível em: https://www.fao.org/4/i0842e/i0842e10.pdf. Acesso em: 13 dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Gabinete do Ministro. Instrução Normativa nº 11, de 20 de outubro de 2000. [Aprova o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade do Mel]. Brasília, DF: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2000. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/ptbr/assuntos/inspecao/produtosanimal/legislacao/IN112000RTmel.pdf. Acesso em: 20 dez. 2025.

CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION. Codex Standard for Honey: CODEX STAN 12-1981. Roma: FAO; WHO, 1981. Revisões: 1987, 2001. p. 1–8. Disponível em: https://www.fao.org/input/download/standards/310/cxs_012e.pdf. Acesso em: 28 dez. 2025.

DA SILVA, P. M. et al. Honey: Chemical composition, stability and authenticity. Food Chemistry, v. 196, p. 309–323, 2016.

EUROPEAN COMMISSION. Directorate-General for Agriculture and Rural Development. Honey: Market Presentation. Brussels: European Commission, 2024. 42 slides. Disponível em: https://agriculture.ec.europa.eu/document/download/c04a9774-5ba3-41f5-b256-08396b2888ec_en?filename=market-presentationhoney_spring2024_en.pdf. Acesso em: 25 abr. 2026.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Honey market analysis and global consumption profiles: Central African Republic case study. Rome: FAO, 2009a. Disponível em: https://openknowledge.fao.org/items/7d4d3410-263a-4f9d-bc59-2071ffd65b96. Acesso em: 26 abr. 2026.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Honey quality and international regulatory standards. Rome: FAO, 2009b. Disponível em: https://www.fao.org/4/i0842e/i0842e10.pdf. Acesso em: 26 abr. 2026.

FAO; IZSLT; APIMONDIA. Honey. Rome: FAO, 2019. 1 infográfico. Disponível em: https://openknowledge.fao.org/items/7d4d3410-263a-4f9d-bc59-2071ffd65b96. Acesso em: 25 abr. 2026.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agropecuária: Mel de abelha. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producaoagropecuaria/mel-de-abelha/br. Acesso em: 10 maio 2026.

KEČKEŠ, S. et al. Antioxidant activity of different floral origin honeys. Journal of the Serbian Chemical Society, v. 78, n. 6, p. 805–815, 2013.

SANTOS, F. K. G.; SILVA, R. A.; RODRIGUES, A. E.; DA SILVA, C. E. A.; DE OLIVEIRA, M. F.; ALMEIDA-MURADIAN, L. B. Rheological and some physicochemical characteristics of selected floral honeys from plants of Caatinga. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 86, n. 4, p. 1981- 1994, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0001-3765201420140061. Acesso em: 24 jan. 2026.

WHITE, J. W. Spectrophotometric method for hydroxymethylfurfural in honey. Journal of the Association of Official Analytical Chemists, v. 62, n. 3, p. 509–514, 1979.

CÓDIGO: ET0586

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: apenas com óleo base PAO 40, com líquido iônico [EMIM] Cl e com líquido iônico BMIN. Os resultados indicam que durante a usinagem em velocidade baixa, apenas o óleo base se mostrou mais eficiente, prolongando a vida da ferramenta, enquanto na velocidade alta, o BMIN se saiu melhor.

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: Líquidos iônicos; Usinagem; Lubrificação em quantidade mínima (MQL).

TITLE: Performance Evaluation of Ionic Liquids in Machining Processes

Abstract

Machining processes are fundamental to the manufacturing industry; however, they face challenges related to friction, high temperatures, and premature wear of cutting tools. Traditionally, conventional cutting fluids are applied to mitigate these problems, but they have negative environmental impacts. In this context, ionic liquids have emerged as promising alternatives due to their low vapor pressure, thermal and chemical stability, and lower 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 at cutting speeds of 70 m/min and 110 m/min. Three machining conditions were compared: base oil PAO 40 alone, ionic liquid [EMIM]Cl, and ionic liquid BMIN. The results indicate that, at the lower cutting speed, only the base oil proved to be more efficient, extending tool life, whereas at the higher cutting speed, BMIN performed better.

It is concluded that the use of MQL increases tool life and that ionic liquids have the potential to improve surface quality, although further tests are necessary to validate their feasibility as sustainable alternatives to conventional cutting fluids.

Keywords: Ionic liquids; Machining; Minimum Quantity Lubrication (MQL).

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 0,12 mm/rot, e a profundidade de corte foi fixada em 0,2 mm no diâmetro a cada passe.

A aplicação de fluido de corte foi realizada por meio de um sistema de micro lubri-refrigeração (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 com LI BMIN

3. Usinagem com LI [EMIN] Cl

As 3 condições foram realizadas com duas velocidades de corte: 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

Durante os ensaios realizados sob a condição de menor velocidade de corte, correspondente a 70 m/min, foram obtidos tempos de vida da ferramenta de 12.720 s, 5.760 s e 11.280 s para as condições de lubrificação com óleo base, EMIN e BMIN, respectivamente. Dentre as condições avaliadas, apenas o ensaio conduzido com o óleo base puro atingiu o critério de fim de vida previamente estabelecido, correspondente a

um desgaste de flanco de 0,3 mm. Nos ensaios realizados com os fluidos aditivados com líquidos iônicos, entretanto, não foi possível atingir o referido critério de desgaste, uma vez que a ferramenta apresentou ruptura antes de alcançar o limite estabelecido.

Para a condição de maior velocidade de corte, de 110 m/min, foram obtidos tempos de vida de 4.200 s, 11.550 s e 7.500 s para o óleo base, EMIN e BMIN, respectivamente. Observou-se comportamento semelhante ao identificado nos ensaios conduzidos a 70 m/min: a ferramenta submetida à lubrificação com o óleo base atingiu o critério de fim de vida por desgaste, enquanto, nos ensaios com os fluidos contendo líquidos iônicos, ocorreu a ruptura da ferramenta antes que o desgaste de flanco alcançasse o valor limite de 0,3 mm.

A análise comparativa dos resultados obtidos nas duas velocidades de corte permite observar uma diferença significativa no comportamento dos fluidos contendo líquidos iônicos. Embora os ensaios com EMIN e BMIN tenham sido interrompidos pela ruptura da ferramenta, seus tempos de vida, especialmente na condição de 110 m/min, indicam um comportamento potencialmente promissor dos líquidos iônicos como aditivos para a lubrificação no processo de usinagem. Destaca-se, nesse sentido, o desempenho do EMIN, que apresentou tempo de vida de 11.550 s a 110 m/min, superior ao obtido com o óleo base na mesma condição, de 4.200 s.

Entretanto, a ocorrência de ruptura prematura da ferramenta nos ensaios com os fluidos aditivados impede, neste momento, uma comparação direta e conclusiva quanto à superioridade dos líquidos iônicos em relação ao óleo base. A simples comparação dos tempos de ensaio pode não representar adequadamente o desempenho tribológico das condições testadas, uma vez que os mecanismos responsáveis pela ruptura podem estar associados a fenômenos distintos daqueles relacionados exclusivamente ao desgaste progressivo de flanco.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que a adição de líquidos iônicos apresentou potencial para influenciar positivamente o desempenho da lubrificação, com destaque para o EMIN na velocidade de corte de 110 m/min. Apesar das limitações decorrentes da ruptura prematura das ferramentas, os maiores tempos de ensaio observados em determinadas condições indicam que os líquidos iônicos podem contribuir para o desempenho do processo de usinagem. Assim, os resultados obtidos são promissores e reforçam a necessidade de continuidade dos estudos para uma avaliação mais conclusiva da influência desses aditivos sobre a vida da ferramenta e o desempenho da usinagem.

Conclusão

Os resultados obtidos até o presente momento demonstram que o desempenho dos líquidos iônicos como fluidos de corte depende das condições de usinagem empregadas. Nos ensaios realizados a 70 m/min, o óleo base PAO 40 apresentou o melhor desempenho em relação à vida da ferramenta, atingindo o critério de fim de vida estabelecido, enquanto os ensaios com os líquidos iônicos [EMIM] Cl e BMIN foram interrompidos devido à quebra da ferramenta. Para a velocidade de 110 m/min,

observou-se uma tendência diferente, com os líquidos iônicos apresentando maiores tempos de operação antes da quebra quando comparados ao óleo base, indicando um potencial de aplicação em condições de maior velocidade de corte.

Apesar desses resultados indicarem um comportamento promissor dos líquidos iônicos, a ocorrência de quebra das ferramentas durante os ensaios impede, neste momento, uma avaliação conclusiva quanto ao aumento de sua vida útil. Dessa forma, torna-se necessária a realização de análises mais aprofundadas dos mecanismos de desgaste e das superfícies das ferramentas após os ensaios, buscando identificar os fatores responsáveis pelas falhas observadas.

Assim, conclui-se que os líquidos iônicos apresentam potencial para aplicação como lubrificantes na usinagem, especialmente em condições de maior velocidade de corte. Entretanto, novos ensaios e análises são necessários para compreender seu comportamento, avaliar sua influência sobre a vida da ferramenta e a qualidade superficial da peça e, consequentemente, determinar sua viabilidade como alternativa aos fluidos de corte convencionais.

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.

CÓDIGO: ET0720

AUTOR: LÍVIA MARIA BEZERRA DA SILVA

ORIENTADOR: LEONARDO ANDRADE DE ALMEIDA

TÍTULO: Avaliação da Viabilidade da Caracterização Atmosférica de Super-Terras a partir de Dados dos Satélites Kepler e TESS

Resumo

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a possibilidade de caracterização atmosférica de exoplanetas classificados como Super-Terras (1.25–2 R⊕) por meio da comparação dos parâmetros de trânsito (Rp/R*) obtidos pelos satélites Kepler e TESS. A amostra final consiste em 59 objetos selecionados a partir do NASA Exoplanet Archive e checados individualmente quanto à disponibilidade de curvas de luz no domínio exoMAST e na biblioteca Lightkurve. Foram determinados os parâmetros físicos e orbitais (período, Rp/R*, semi-eixo, inclinação, excentricidade, temperatura efetiva, gravidade, metalicidade) e calculados os coeficientes de limb darkening adaptados para Kepler e TESS. As curvas de luz foram inspecionadas setor a setor; procedimentos de detrending/normalização (lightkurve.flatten() e wotan) foram aplicados sempre que possível. Observou-se que a maioria das curvas apresenta elevado ruído, trânsitos incompletos ou falta de normalização, o que limita fortemente a sensibilidade da técnica utilizada. Em consequência, não foi possível obter evidências precisas de assinaturas atmosféricas nas Super-Terras com os dados atualmente disponíveis: o nível de ruído torna a detecção de variações em Rp/R* pouco confiável para identificação de elementos ou moléculas. Recomendam-se dados de maior qualidade (S/N), observações adicionais com instrumentos espectroscópicos e desenvolvimento de rotinas de normalização mais eficazes para trabalhar com estas classes de alvo.

Palavras-chave: Super-Terra. Atmosfera. Bioassinaturas. TESS. Kepler. Satélites.

TITLE: Assessing the Feasibility of Atmospheric Characterization of Super-Earths with Kepler and TESS Data

Abstract

This research aimed to evaluate the feasibility of atmospheric characterization of exoplanets classified as Super-Earths (1.25–2 R⊕) through the comparison of transit parameters (Rp/R*) obtained from the Kepler and TESS satellites. The final sample consists of 59 objects selected from the NASA Exoplanet Archive and individually verified for light curve availability in the exoMAST database and through the

Lightkurve library. Physical and orbital parameters were collected (orbital period, Rp/R*, semi-major axis, inclination, eccentricity, effective temperature, surface gravity, and metallicity), and limb-darkening coefficients were computed specifically for the Kepler and TESS bandpasses. The light curves were inspected sector by sector, and detrending/normalization procedures (lightkurve.flatten() and wotan) were applied whenever feasible. It was found that most light curves exhibit significant noise, incomplete transits, or normalization issues, which strongly limits the sensitivity of the adopted technique. As a consequence, it was not possible to obtain robust evidence of atmospheric signatures in Super-Earths with the currently available data. The noise level makes the detection of variations in Rp/R* unreliable for identifying specific elements or molecules. Higher signal-to-noise (S/N) data, additional observations with spectroscopic instruments, and the development of more effective normalization routines are recommended for future studies of this class of targets.

Keywords: Super-Earth. Atmosphere. Biosignatures. TESS. Kepler. Satellite.

Introdução

O estudo de exoplanetas representa atualmente um dos campos mais dinâmicos da Astrofísica, impulsionado pela expressiva expansão no número de objetos confirmados nas últimas décadas. Desde a descoberta do primeiro planeta orbitando uma estrela do tipo solar, 51 Pegasi b, por Michel Mayor e Didier Queloz em 1995 [1], o foco da área deslocou-se progressivamente da simples detecção para a caracterização física e atmosférica desses sistemas. Atualmente, com mais de seis mil exoplanetas confirmados pela NASA, torna-se fundamental compreender não apenas sua existência, mas também suas propriedades estruturais e atmosféricas, de modo a aprofundar o entendimento sobre formação e evolução de sistemas planetários, incluindo o próprio Sistema Solar, e sobre possíveis cenários de habitabilidade.

Entre os métodos observacionais disponíveis, o método de trânsito planetário destaca-se por seu sucesso em número de descobertas. Ele baseia-se na diminuição periódica do brilho da estrela quando o planeta passa à sua frente, em um alinhamento observador-planeta-estrela, bloqueando parte da radiação estelar [2]. A profundidade da curva de luz permite estimar o raio do planeta em unidades do raio estelar (Rp/R*), enquanto a periodicidade do evento fornece o período orbital.

Quando associado à espectroscopia de transmissão, o trânsito torna-se uma ferramenta poderosa de caracterização atmosférica. Durante o evento, parte da luz estelar atravessa as camadas externas da atmosfera planetária, sofrendo absorção e espalhamento por átomos e moléculas. Essa interação manifesta-se como pequenas variações no raio efetivo do planeta em função do comprimento de onda. Em termos observacionais, busca-se identificar diferenças sutis em Rp/R* entre distintas faixas espectrais [3][4].

No entanto, para planetas de pequeno porte, como as Super-Terras, a variação esperada dos valores de Rp/R* entre bandas é tipicamente da ordem de poucas partes por milhão (ppm). Tal precisão exige dados fotométricos de alta qualidade e métodos mais eficazes de redução e normalização capazes de mitigar ruídos instrumentais e estelares.

Nesse contexto, as missões Kepler e TESS desempenham papel central. Embora concebidas primordialmente para detecção de exoplanetas via fotometria de trânsito, operam em faixas espectrais distintas e parcialmente complementares: Kepler observa aproximadamente entre 420–900 nm, enquanto TESS cobre 600–1000 nm. A região de sobreposição e as porções exclusivas de cada instrumento permitem, em princípio, investigar dependência espectral no parâmetro Rp/R* por meio da comparação entre as duas missões.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade de investigar possíveis assinaturas atmosféricas em exoplanetas do tipo Super-Terra por meio da análise comparativa de dados fotométricos de trânsito obtidos por Kepler e TESS, verificando até que ponto a qualidade dos dados disponíveis permite extrair informações fisicamente relevantes.

Metodologia

O primeiro passo metodológico consistiu na definição da amostra. A partir do portal NASA Exoplanet Archive, realizou-se uma filtragem para selecionar exoplanetas classificados como Super-Terras, definidos com raio entre 1.25 e 2 raios terrestres ($1.25R_\oplus < RP < 2R_\oplus$) [5] e massa entre 1 e 10 massas terrestres ($1M_\oplus \leq MP \leq 10M_\oplus$) [6]. Após verificação individual dos objetos e conferência da disponibilidade de dados fotométricos, obteve-se uma amostra final composta por 59 objetos observados por ambos os satélites Kepler e TESS.

Para cada objeto, foram coletados parâmetros físicos e orbitais que seriam necessários à análise do trânsito, incluindo: período orbital, razão de raios (Rp/R*), semi-eixo maior em unidades de raio estelar (a/R*), inclinação orbital (inc), excentricidade (ecc), argumento do periastro (ω), temperatura efetiva estelar (Teff), gravidade superficial (log g) e metalicidade ([Fe/H]).

A aquisição desses parâmetros foi realizada de forma programática por meio da API do portal exo.MAST (Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes), utilizando a adaptação em Python disponibilizada por ExoWanderer (exomast_api.py). Implementou-se uma função personalizada que itera sobre um dataframe contendo a lista de alvos e extrai seletivamente os parâmetros de interesse, organizando-os em planilhas para posterior conferência e análise.

Em seguida, foram determinados os coeficientes de escurecimento de limbo (limb darkening) para cada estrela e para as bandas correspondentes aos satélites Kepler e TESS. Esses coeficientes foram obtidos por meio de interpolação nos modelos teóricos de escurecimento de limbo produzidos por Claret e Bloemen [7][8]. A rotina de interpolação em Python foi implementada e disponibilizada por João Aires [9].

A etapa seguinte concentrou-se na obtenção e inspeção das curvas de luz. Os dados foram baixados utilizando a biblioteca Lightkurve [10] e também a partir de arquivos disponíveis no domínio exoMAST.

Após a aquisição, cada curva de luz foi submetida à inspeção visual. A verificação foi realizada tanto em setores individuais quanto em combinações de setores, quando disponíveis. Dois critérios principais orientaram o descarte de dados: (i) integridade do trânsito (curvas com trânsitos parciais, sem cobertura completa de ingresso ou egresso, foram removidas); e (ii) relação sinal-ruído (séries cuja dispersão fotométrica era comparável ou superior à profundidade do trânsito esperado também foram descartadas).

A etapa seguinte consistiu na normalização das curvas. Como as séries temporais brutas apresentam tendências de baixa frequência decorrentes de efeitos instrumentais ou atividade estelar, tornou-se necessário aplicar detrending (normalização) nas curvas de luz necessitadas antes de qualquer análise adicional. Para isso, utilizou-se a biblioteca wotan, em Python, empregando a função flatten com estimador biweight em janela deslizante [11]. Esse método calcula a tendência local ignorando outliers (neste caso, os próprios trânsitos) evitando que o algoritmo suavize artificialmente a profundidade do evento.

Apesar dos testes com diferentes tamanhos de janela e configurações, grande parte das curvas apresentaram nível de ruído elevado ou com distorções que comprometiam a identificação clara dos trânsitos. Inicialmente, o planejamento do projeto previa avançar para etapas de modelagem detalhada dos trânsitos e comparação sistemática entre valores de Rp/R* obtidos em Kepler e TESS, confrontando-os com modelos atmosféricos teóricos. Contudo, devido à limitação observacional encontrada na etapa de tratamento das curvas, não foi possível prosseguir de maneira eficaz para essas fases. Assim, o trabalho concentrou-se na avaliação crítica da qualidade dos dados e da viabilidade da técnica para Super-Terras nas condições disponíveis.

Resultados e Discussões

A análise das 59 Super-Terras revelou um cenário observacional mais restritivo do que o inicialmente previsto. Embora a amostra seja numericamente relevante, a qualidade das curvas de luz mostrou-se o principal fator limitante da pesquisa.

A inspeção setor a setor evidenciou que uma fração significativa dos dados apresentava trânsitos incompletos ou dispersão fotométrica elevada. Em diversos casos, a amplitude do ruído era da mesma ordem de grandeza da profundidade esperada do trânsito. Considerando que, para Super-Terras, Rp/R* é naturalmente pequeno, qualquer flutuação instrumental ou variabilidade estelar residual impacta diretamente a confiabilidade da medida.

Nos dados do TESS, o ruído fotométrico frequentemente dificultou a identificação visual clara do trânsito. Já nos dados do Kepler, embora a precisão instrumental seja geralmente superior, também foram observadas tendências residuais e problemas de normalização que não foram completamente mitigados pelos métodos aplicados.

A aplicação do detrending com wotan permitiu remover parte das tendências de longo prazo, porém não reduziu significativamente a dispersão em grande parte da amostra. Em

alguns casos, a normalização melhorou a definição geral da curva; em outros, a diferença foi mínima, mantendo-se um nível de incerteza incompatível com a sensibilidade exigida para detecção de variações espectrais sutis.

Do ponto de vista físico, a proposta central baseava-se na comparação de Rp/R* medido nas faixas de 420–900 nm (Kepler) e 600–1000 nm (TESS). Como cada instrumento cobre regiões parcialmente distintas do espectro (veja Figura 1), diferenças estatisticamente significativas nesse valor poderiam indicar absorção atmosférica dependente do comprimento de onda. Para Super-Terras, porém, essa variação esperada de Rp/R* é extremamente pequena, geralmente da ordem de poucas partes por milhão (ppm). Isso significa que, para conseguirmos detectar esse efeito, o erro da medição precisa ser ainda menor do que essa pequena variação.

Na prática, o que observamos foi que o nível de ruído (dispersão) das curvas de luz, na maioria dos casos, era maior do que a variação que gostaríamos de medir. Em outras palavras, o ruído dos dados é maior do que o possível sinal atmosférico. Como consequência, não foi possível identificar de forma segura qualquer dependência espectral em Rp/R*, pois para nenhum dos objetos da amostra obteve-se dados razoáveis dos dois satélites para realizar a comparação.

Por esse motivo, também não foi viável classificar os objetos em níveis de significância estatística (como >3σ, entre 2σ e 3σ, etc.) para detectar indícios de absorção atmosférica, conforme proposto inicialmente. A etapa fundamental, que era medir Rp/R* com precisão suficiente e comparar os valores de ambos os satélites, não atingiu o grau de confiabilidade necessário para sustentar esse tipo de análise comparativa.

Esse resultado evidencia um ponto importante: a limitação não está necessariamente na inexistência de atmosfera nas Super-Terras analisadas, mas sim na sensibilidade instrumental e na qualidade dos dados fotométricos disponíveis. Para essa classe de planetas, a caracterização atmosférica por meio exclusivo de fotometria de banda larga mostra-se extremamente sensível à relação sinal-ruído.

Conclusão

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade de caracterização atmosférica de exoplanetas do tipo Super-Terra por meio da comparação de dados fotométricos de trânsito obtidos pelas missões Kepler e TESS. A metodologia foi estruturada de maneira reprodutível, envolvendo seleção da amostra, aquisição de parâmetros físicos e orbitais, cálculo de coeficientes de escurecimento de limbo e tratamento das curvas de luz.

Entretanto, a análise revelou que a principal limitação do estudo está associada à qualidade observacional dos dados disponíveis. Para a maioria dos objetos analisados, o nível de ruído e as incertezas fotométricas mostraram-se comparáveis ou superiores às variações esperadas em Rp/R* decorrentes de possíveis assinaturas atmosféricas.

Dessa forma, não foi possível concluir a pesquisa da maneira inicialmente planejada, pois a comparação robusta entre as medições de Kepler e TESS não atingiu o grau de precisão necessário para inferências físicas confiáveis. A caracterização atmosférica de Super-Terras, especialmente utilizando apenas dados fotométricos de banda larga, mostrou-se um problema altamente sensível à qualidade do dado.

Apesar disso, o estudo permitiu estabelecer de forma clara os limites metodológicos e observacionais dessa abordagem. Como perspectiva futura, recomenda-se priorizar alvos com maior relação sinal-ruído, utilizar técnicas mais avançadas de modelagem e combinar fotometria com espectroscopia de maior resolução, ampliando assim o potencial de detecção de assinaturas atmosféricas em planetas de pequeno porte.

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] BOZZA, Valerio et al. Methods of detecting exoplanets. Astrophysics and Space Science Library: Berlin, Germany, v. 428, 2016.

[3] SCHWIETERMAN, Edward W. et al. Exoplanet biosignatures: a review of remotely detectable signs of life. Astrobiology, v. 18, n. 6, p. 663-708, 2018.

[4] KREIDBERG, L. 2018, Exoplanet Atmosphere Measurements from Transmission Spectroscopy and Other Planet Star Combined Light Observations, Handbook of Exoplanets, 100. doi:10.1007/978-3-319-55333-7_

[5] HOWE, A. R.; BURROWS, A. S.; VERNE, W. Mass-radius relations and core-envelope decompositions of super-Earths and sub-Neptunes. The Astrophysical Journal, v. 787, n. 2, p. 173, 2014. DOI: 10.1088/0004-637X/787/2/173.

[6] VALENCIA, Diana; SASSELOV, Dimitar D.; O'CONNELL, Richard J. De

[7] CLARET, A. A new method to compute limb-darkening coefficients for stellar atmosphere models with spherical symmetry: the space missions TESS, Kepler, CoRoT, and MOST. Astronomy & Astrophysics, v. 618, p. A20, 2018. DOI: 10.1051/0004-6361/201833262.

[8] CLARET, A.; BLOEMEN, S. Gravity and limb-darkening coefficients for the Kepler, CoRoT, Spitzer, uvby, UBVRIJHK, and Sloan photometric systems. Astronomy & Astrophysics, v. 529, p. A75, 2011. DOI: 10.1051/0004-6361/201016158.

[9] AIRES, João. Quad-LD-coeff: a simple interpolation to obtain the quadratic limb-darkening coefficients. GitHub repository, 2026.

[10] COLLABORATION, L.; CARDOSO, J.; HEDGES, C.; GULLY-SANTIAGO, M.; SAUNDERS, N.; CODY, A.; BARCLAY, T.; HALL, O.; SAGEAR, S.; TURTELBOOM, E.; et al. Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python. Astrophysics Source Code Library, ascl:1812.013, 2018.

[11] HIPPKE, M.; DAVID, T. J.; MULDERS, G. D.; HELLER, R. Wotan: Comprehensive time-series detrending in python. The Astronomical Journal, 158(4):143, 2019.

Anexos

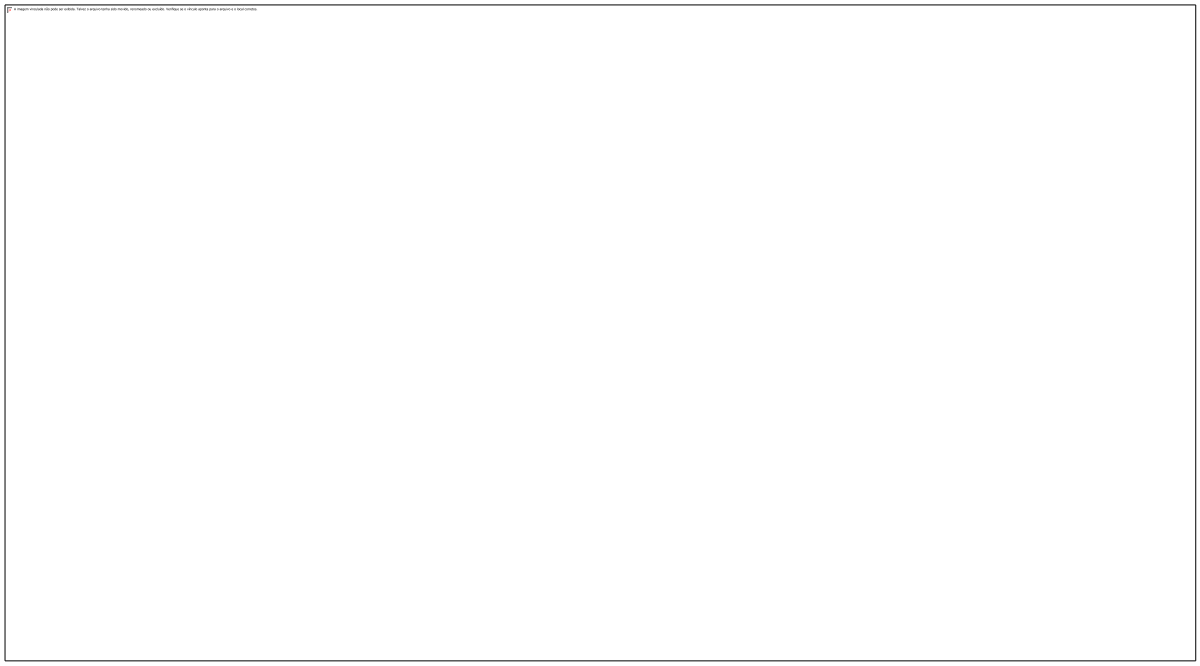


Figura 1 - Respostas espectrais dos filtros dos satélites Kepler (em preto) e TESS (em azul).

CÓDIGO: ET0875

AUTOR: FRANCISCA THALLYANA DE LIMA CAVALCANTE SOUZA

ORIENTADOR: MARY LUCIA DA SILVA NOGUEIRA

TÍTULO: Os desafios para a Avaliação Ambiental em Projetos Eólicos Offshore na Região de Areia Branca, RN.

Resumo

A região Nordeste apresenta condições favoráveis à geração de energia eólica offshore e contribui na diversificação da matriz elétrica brasileira. O trabalho elenca os principais desafios para avaliação ambiental em projetos eólicos offshore na região de Areia Branca/RN e baseou-se no: Termo de Referência (TR), Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental EIA/Rima Tipologia:Complexos Eólicos Marítimos (Offshore) do IBAMA (2020); Decreto 10.946/22; Lei 11.714/24; Lei nº 15.097/25 e a Lei municipal 1700/25. O TR estabelece os critérios do estudo de impacto ambiental (EIA/RIMA) para subsidiar o prévio licenciamento, detalhamento do diagnóstico ambiental e análise das alternativas tecnológicas. O marco legal das eólicas offshore, disciplina o aproveitamento do potencial energético offshore no país, os critérios de concessão de áreas marítimas de exploração (prismas) e estabelece as áreas prioritárias de conservação. A Lei municipal de Areia Branca está alinhada com a Lei Nº 11.714, a Política Estadual de Incentivo à Economia do Mar, a fim de atrair investimentos e a primeira licença prévia do país foi concedida ao Projeto Usina Eólica offshore - Sítio de Testes do SENAI RN. Diante disso, a criação de uma nova Área de Proteção Ambiental (APA) está de acordo com o TR do IBAMA, com a exigência do mapeamento das áreas prioritárias de conservação para conciliar a instalação dos projetos eólicos, a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável local.

Palavras-chave: Energias renováveis. Economia do Mar. Licenciamento Ambiental

TITLE: The Challenges for Environmental Assessment of Offshore Wind Projects in the Areia Branca/RN Region.

Abstract

The Brazilian Northeast region presents exceptionally favorable natural conditions for the generation of offshore wind energy, playing an essential role in diversifying the national electricity matrix. This study examines the critical challenges in the

environmental assessment of offshore wind projects within the Areia Branca (RN) region, using the following regulatory benchmarks: IBAMA's 2020 Terms of Reference (TR) for Offshore Wind Complexes; Decree No. 10,946/22; Law No. 11,714/24; Law No. 15,097/25; and Municipal Law No. 1,700/25. The TR establishes the essential criteria governing the Environmental Impact Study and Report (EIA/RIMA) to support preliminary licensing, demanding detailed environmental diagnoses and evaluations of technological alternatives. Concurrently, the national legal framework regulates offshore energy potential and outlines parameters for granting maritime exploration areas (prisms), while defining priority conservation zones. Areia Branca's municipal legislation aligns with Law No. 11,714 (the State Policy for Incentivizing the Ocean Economy) to attract investments, leading to the country's first preliminary license granted to the SENAI RN Test Site Offshore Wind Power Plant Project. Consequently, the creation of a new Environmental Protection Area (APA) complies with IBAMA's TR by mapping priority conservation areas to reconcile wind energy infrastructure, environmental preservation, and sustainable local socio-economic development.

Keywords: Renewable energy. Ocean Economy. Environmental Licensing

Introdução

A região Nordeste do Brasil apresenta condições favoráveis à geração de energia eólica offshore, com potencial econômico e contribuição na diversificação na matriz elétrica brasileira. Segundo Arantes e Souza (2025), "além da alta velocidade constante dos ventos, outro fator favorável ao desenvolvimento da energia eólica offshore no Brasil é a profundidade das águas costeiras." Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é elencar os principais desafios para avaliação ambiental em projetos eólicos offshore na região de Areia Branca, no Rio Grande do Norte.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA,2025), o estado é o maior produtor brasileiro de energia eólica destaca "O potencial para futura geração offshore – com parques eólicos no mar – alcança, por sua vez, 54,5 GW e seria suficiente para suprir cerca de ⅓ de toda energia elétrica brasileira em 2020 (aproximadamente 651 TWh)".

A região de Areia Branca, situada na Costa Branca do Rio Grande do Norte, possui importantes projetos energéticos e de mineração no mar, conforme a figura 01, a serem desenvolvidos. Apresenta importante papel na biodiversidade marinha, influência sobre as condições climáticas, reservas de recursos energéticos, minerais e pesqueiros, além de possuir rotas de navegação para comércio exterior. Diante desse cenário, a pesquisa aborda um tema relevante quanto à sustentabilidade no ambiente marinho e os desafios para avaliação ambiental em projetos eólicos offshore nessa região do RN, onde foi concedida a primeira licença prévia do país.

De acordo com estudos da Comissão Interministerial para assuntos do mar, da Marinha do Brasil, "em virtude de possuir área equivalente a 67% do nosso território terrestre, com dimensão e biodiversidade semelhantes ao da Amazônia Verde, convencionou-se

chamá-la de AMAZÔNIA AZUL". A região Costa Branca, onde encontra-se o município de Areia Branca/RN, está inserida nessa área e apresenta potencial energético, logístico e econômico, onde é o maior produtor de sal marinho do país e responsável por 95% da produção nacional. (Silva et al,2026)

Quanto aos aspectos geográficos, a plataforma continental do Estado do RN abrange 410 km de extensão em duas direções, plataforma Leste denominada (Oriental); e plataforma Norte denominada de (Setentrional), onde localiza-se o município de Areia Branca, esta com profundidade de aproximadamente 60m eapresenta sistema costeiro dinâmico, "caracterizado por largura reduzida e profundidades rasas em comparação com outras partes da plataforma brasileira. Possui uma largura média de 40 km", de acordo com informações disponíveis no estudo Vital et al.(2010).

A energia eólica no nordeste teve início no ano de 1992 em Fernando de Noronha, de forma onshore (ABEEÓLICA,2025). Em junho de 2025, o Serviço Nacional da Indústria do Rio Grande do Norte (Senai RN) obteve a primeira licença prévia ambiental eólica offshore do país, através do Instituto Senai de Inovação em Energias Renováveis (ISI-ER), com o objetivo de fortalecer o sistema de eólicas offshore no país e oferecer inovação ao setor.

A fim de contribuir e acompanhar a evolução dos projetos nessa região, pretende-se identificar os desafios para avaliação ambiental de projetos eólicos no mar, da disponibilidade de dados ambientais para avaliação ambiental sustentável diante da legislação pertinente. Busca-se fortalecer a base de conhecimentos sobre o tema pesquisado e colaborar com a matriz energética através de fontes renováveis para o desenvolvimento sustentável de Areia Branca e do Estado do RN.

A pesquisa busca analisar o termo de referência do IBAMA e o marco regulatório para projetos offshore no Brasil, pesquisar sobre legislação pertinente ou correlacionável no âmbito do município de Areia Branca/RN e dados ambientais disponíveis, além de correlacionar a legislação analisada e dados disponíveis a fim de identificar os desafios a serem superados.

Metodologia

O estudo foi desenvolvido com fins de pesquisa exploratória e documental quanto aos meios (Brasileiro, 2026) mediante a análise de documentos, a fim de mostrar o cenário da energia eólica offshore em Areia Branca/RN e identificar os principais desafios para a realização da avaliação ambiental. Através da pesquisa bibliográfica e documental com base na análise da Legislação para projetos eólicos offshore, pretendeu-se verificar os textos legais referentes ao tema.

A metodologia baseou-se na pesquisa, leitura, interpretação e correlação dos documentos: Termo de Referência, Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental EIA/Rima Tipologia: Complexos Eólicos Marítimos (Offshore) do IBAMA (2020); Decreto 10.946/22, que dispõe sobre o uso dos espaços físicos e o

aproveitamento dos recursos naturais no mar territorial para geração de energia offshore; Lei Estadual 11.714/24, através da criação política estadual do RN de incentivo à economia do mar; Lei nº 15.097/25, o marco regulatório que disciplina o aproveitamento de potencial energético offshore; Lei 1700, de 05/12/2025, que instituiu a Política Municipal de Incentivo à Economia do Mar no município de Areia Branca/RN. Esses documentos são estratégicos para nortearem a regulação dos projetos a serem instalados na região.

Inicialmente, foi realizado o levantamento da literatura disponível sobre o tema estudado e documentos emitidos pelo IBAMA. O cenário do estudo foi a região marítima de Areia Branca/RN, local com grande biodiversidade e importância para a transição energética. E posteriormente, feita a análise dos documentos Decreto 10.946/22 e a Lei 15.097/25 que contêm as regras de cessão das áreas marinhas e espaços no mar territorial, o cuidado com a preservação ambiental e unidades de conservação, as áreas onde serão desenvolvidas as atividades de geração de energia no mar e o desenvolvimento socioeconômico local.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados e Discussões

O Termo de Referência para complexos eólicos marítimos (offshore), consiste no documento que fundamenta a elaboração de Estudos de Impacto ambiental (EIA) e Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) a serem analisados pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA) para estabelecer as diretrizes técnicas de elaboração desses estudos com foco no licenciamento ambiental prévio desses complexos no Brasil.

O estudo possui critérios técnicos e leva em consideração as características de projeto para o prévio licenciamento de eólicas em alto mar, sendo adaptável ao local onde está inserido e é aplicado a processos de grande impacto ambiental. Deve conter a descrição do empreendimento e atividade, onde será realizado, conter os objetivos e sua relevância ambiental e socioeconômica, política e social nas esferas municipal, estadual e nacional e a justificativa da implantação e operação do complexo eólico offshore.

O documento deve ser organizado em sumário, entregue em pdf e de acordo com as especificações determinadas, podendo conter figuras e elementos de comunicação visual, como mapas e fotografias. Na introdução deve conter detalhadamente a descrição da equipe técnica responsável pelo estudo e todo detalhamento acerca do empreendimento: identificação do empreendedor e da empresa de consultoria.

Já a caracterização estabelece todos os requisitos, descrição do complexo eólico, destaca as motivações e justificativas do empreendimento, suas fases e cronograma previsto, já com o custo total estimado do complexo eólico offshore. Também deve indicar os acessos e indicar rotas seguras de navegação, pesca e uso recreativo durante a fase de instalação e de operação.

É pertinente realizar e detalhar o diagnóstico ambiental (meios físico, biótico e socioeconômico) e analisar as alternativas tecnológicas, “prever qualitativamente eventuais dragagens, caso se aplique, segundo Resolução CONAMA 454/2012”, apresentar as cotas de profundidade e estimativa do volume que será dragado e o reaproveitamento do material no projeto ou descarte no mar; sendo essencial uma completa e detalhada avaliação dos impactos ambientais e análise de risco. (Brasil, 2020).

O estudo deve ir além da descrição técnica, exigindo a contextualização do projeto com o planejamento elétrico, relacionado aos planos de curto e longo prazo do setor nacional e compromissos do Brasil; planejamento marinho, relacionado e estar de acordo com o espaço marinho nacional, da região e ambiental, em conformidade com as políticas ambientais definidas.

É fundamental a realização de análise de compatibilidade, abrangendo toda a legislação federal, estadual e municipal incidente, planos, programas e zoneamento. Deve-se apresentar certidões e anuências da prefeitura atestando a conformidade do local e do tipo de empreendimento terrestre com a legislação de uso e ocupação do solo.

Quanto às Alternativas Tecnológicas e Locacionais, o capítulo é de alta prioridade devido à natureza offshore do projeto. De acordo com o termo de referência: “O empreendedor deverá delimitar a poligonal de viabilidade econômica e operacional do projeto a partir da área portuária de referência para instalação do empreendimento, justificando todos os critérios técnicos adotados para a delimitação da extensão total offshore”.

Várias orientações devem ser seguidas, como o uso de geoprocessamento, e através de várias camadas de informações possibilita a elaboração de mapa para identificação de uso múltiplos: áreas prioritárias para conservação da biodiversidade; ambientes recifais; rotas migratórias de aves; mamíferos marinhos; quelônios; atividades potencialmente conflitantes (pesca, esportes náuticos, turismo, rotas de navegação, exploração de óleo e gás); modelagem de ruídos aquáticos e impacto visual; rotas de navegação portuária; lavras minerais, terrestres e marinhas concedidas ou em prospecção. Devem ser avaliadas e comparadas as três alternativas viáveis (locacionais e tecnológicas) contra a hipótese de não execução, justificando a alternativa preferencial com base no menor nível de interferência ambiental.(IBAMA, 2020)

Conforme a resolução CONAMA 237/97 estabelece os critérios para o licenciamento ambiental e são três fases de licenciamento: prévia, de operação e de instalação, quanto à análise dos impactos ambientais. De acordo com o termo de referência para complexos eólicos offshore, o estudo deve abordar os impactos positivos e negativos nessas fases, bem como no descomissionamento.

Deverão ser continuamente monitorados os seguintes aspectos: ruídos e vibrações; movimentação das embarcações; aumento da turbidez; alterações no leito do mar e linha de costa; iluminação artificial com seus efeitos sobre os animais e na paisagem; atividades pesqueiras, turísticas e navegação; presença dos aerogeradores e suas movimentações e as geração de energia, empregos e impostos e geração de resíduos, de acordo com a figura 02 abaixo com exemplos de alguns dos aspectos ambientais disponível no TR do IBAMA.(Brasil,2020)

Figura 02: Aspectos ambientais

Fonte: Termo de referência IBAMA(2020)

Segundo os resultados obtidos, o Termo de Referência (TR) estabelece os critérios e a necessidade de realização do estudo do EIA/RIMA para subsidiar o prévio licenciamento, os aspectos ambientais e seus efeitos, sendo pertinente a realização e detalhamento do diagnóstico ambiental (meios físico, biótico e socioeconômico), análise das alternativas tecnológicas, análise dos impactos e plano de gestão ambiental.

O IBAMA é responsável pelo licenciamento ambiental, já que o mar territorial pertence à União. E oDecreto 10946/22trata da cessão dos espaços físicos e aproveitamento dos recursos naturais em águas de domínio da União para a geração de energia elétrica offshore, a fim de promover o desenvolvimento sustentável, de acordo com a figura 03:

Decreto 10946/22

Lei 15097/25

A lei 15.097/25 foi sancionada em 10/01/25 e dispõe sobre o marco regulatório das eólicas offshore no Brasil e disciplina o aproveitamento do potencial energético no ambiente marinho em águas interiores do domínio das União. Ela cria as regras para a cessão de de uso por meio de contrato entre a União e o interessado no uso de geração de energia offshore responsável pelo empreendimento, através de contratos que forneçam segurança jurídica.

Com relação ao ao planejamento espacial, ela estabelece os prismas, áreas onde poderão ser realizadas as atividades de produção de energia através das estruturas dos parques eólicos a serem instalados no mar e determina que as áreas de conservação sejam respeitadas e não sejam constituídas prismas em rotas de pesca e em áreas protegidas pela legislação ambiental, a fim de conservar a biodiversidade do local. Trata ainda do descomissionamento, as medidas realizadas para o retorno ao estado mais próximo do original após o fim do ciclo de vida do empreendimento.

Quanto ao aproveitamento do potencial offshore, são observados os princípios: desenvolvimento sustentável; a geração de emprego e renda e uso dos recursos naturais de forma racional, a fim de garantir segurança energética; o desenvolvimento local e regional; o estudo de novas tecnologias para melhor aproveitamento do potencial offshore; preservação da cultura oceânica e do meio ambiente; o compromisso com a transparência e consulta prévia às comunidades impactadas com as devidas informações sobre o empreendimento offshore. (Brasil,2025)

O marco regulatório determina que a cessão de uso dos bens da União será feita pelo poder executivo, mediante autorização ou concessão, e impulsionará o desenvolvimento de pesquisa e estudo de novas tecnologias. A previsão da cessão de áreas no mar territorial para a geração de energia conforme a figura 04 será feita através de oferta permanente: os prismas são demarcados a partir da solicitação dos interessados e através de autorização; e oferta planejada: quando o poder concedente oferta os prismas já delimitados e a cessão será feita através de concessão.(Brasil,2025)

Cessão de uso de bens da União para geração de energia elétrica (offshore) Lei 15.097/25

Conforme o artigo 11 do marco regulatório, os contratos de cessão serão divididos em duas fases: avaliação e execução. Na avaliação, será feita a análise de viabilidade técnica e econômica, estudo preliminar de impactos ambientais, avaliação do empreendimento se compatível com as demais atividades locais e estudos georreferenciados sobre o potencial energético do prisma, inclusive com informações dos ventos e correntes marítimas. Já na fase de execução ocorrerá a implantação do empreendimento e aproveitamento de potencial de energia offshore no prisma.

Quanto às participações governamentais, o instrumento convocatório e o termo de outorga e os valores seguirão a seguinte distribuição:

I) bônus de assinatura: valores determinados no edital e no termo para obtenção da outorga.

II) A taxa de ocupação da área será paga anualmente, destinada à União, e os valores recebidos serão para investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação em energia e indústria.

III) participação proporcional. Para a participação proporcional, a figura 05 mostra os percentuais estabelecidos conforme critérios do artigo 14:

Figura 05: Distribuição das participações governamentais (proporcional) com base na Lei 15.097/25 (Artigo 14)

Fonte: elaborado pelo autor (2026)

O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), órgão responsável que formula as políticas e diretrizes do setor de energia, irá estabelecer o cumprimento do regulamento das cessões, conforme o primeiro parágrafo do artigo 5º e o artigo 8º da lei e as providências das medidas necessárias para o aproveitamento de geração de energia offshore. O regulamento fornece as diretrizes econômicas, jurídicas, financeiras, a qualificação técnica e ações de promoção à indústria a serem cumpridas pelos empreendimentos interessados nas ofertas planejadas e permanentes.

Areia Branca e RN

O município de Areia Branca, situado na Costa Branca do Rio Grande do Norte, possui área de 342.749 Km2 e população de 24.093 habitantes, de acordo com dados do último censo realizado em 2022 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Destaca-se pela produção de: sal marinho, petróleo, turismo, esportes, pesca artesanal e segundo dados da prefeitura municipal, o município possui 350 colônias de pescadores cadastrados e esta atividade possui um volume de R$ 20 milhões anuais, e mais recentemente, pelo potencial eólico offshore.

Quanto à legislação destinada a projetos no mar no âmbito do município de Areia Branca, o município legisla sobre o solo costeiro e a União, representadas pela Marinha e Secretaria do Patrimônio da União (SPU). O Plano Diretor de Areia Branca define as

zonas urbanas e zonas de proteção ambiental municipal, sendo a Lei base desse ordenamento e regula as atividades na orla e as exigências para construções.

Projetos que causem impacto ambiental em Areia Branca tramitam no Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente (IDEMA) para devida análises dos projetos e estando tudo conforme a lei, posterior emissão de licenças prévia, de instalação e operação. O estado do RN possui um Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro, que estabelece objetivos e diretrizes e disciplina os instrumentos de sua elaboração e aprovação e execução, instituído através da Lei nº 6.950, de 20/08/1996.

De acordo com essa Lei, o município de Areia Branca faz parte do setor Costeiro Norte ou Setentrional, junto a outros municípios. São instrumentos do Plano de Gerenciamento Costeiro o zoneamento ecológico, planos de gestão, monitoramento e sistema de informações. Ele visa a melhoria da qualidade de vida das populações locais e proteção dos ecossistemas que mantenham a qualidade ambiental e o desenvolvimento sustentável.

Os ecossistemas frágeis que compõem a Reserva da Biosfera da Mata Atlântica são áreas de preservação, conforme descrito no artigo 20 do referido plano, como as dunas, com ou sem cobertura vegetal, restingas, os manguezais, brejos e matas ciliares. As atividades que possam causar degradação nessas áreas deverão ser objeto do devido licenciamento ambiental e quando for o caso, Estudo de Impacto Ambiental.

Em relação aos projetos eólicos offshore, o IBAMA é o responsável pelo licenciamento ambiental, já que o mar territorial pertence à União. Em 2025 foi emitida a primeira licença prévia do país para um projeto eólico offshore (figura 06), concedida ao Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis. O projeto conta com dois aerogeradores e será instalado em Areia Branca, localizada a 20 km da costa, próximo ao Porto Ilha.

Figura 06: Projetos no RN com processo de licenciamento ambiental tramitando no IBAMA (atualizado em 27/02/2026).

Fonte: IBAMA

Em agosto de 2025 o município sediou uma reunião pública importante para sustentabilidade e economia a fim de discutir a criação de uma nova área de Proteção Ambiental (APA) nos Montes Oceânicos das Cadeias Norte e Fernando de Noronha, de acordo com a Câmara Municipal de Areia Branca, através do Instituto Chico Mendes de Biodiversidade (ICMBio). A criação de uma nova Área de Proteção Ambiental (APA) foi tema de debate recente e está em consonância com o estabelecido no TR do IBAMA, com a exigência do mapeamento das áreas prioritárias de conservação, a fim de garantir a instalação dos projetos eólicos, a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável local.

Também foi aprovada a Lei nº 1700, de 05/12/25 que instituiu a Política Municipal de Incentivo à Economia do Mar como estratégia de desenvolvimento socioeconômico do Município de Areia Branca, a fim de fixar diretrizes para as atividades econômicas do município. Dentre as principais atividades descritas no artigo 2º desta lei e na lei estadual, destacam-se : atividades de apoio à extração de óleo e gás offshore; exploração e extração mineral oceânica e offshore; atividades de escoamento, transporte,

distribuição e processamento de gás natural offshore; Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) no ambiente marinho; energias renováveis oceânicas e offshore; implantação ou reforço de estrutura logística, física e de recursos humanos em unidades de conservação marinhas; difusão e popularização das Ciências do Mar. Essa Lei municipal está alinhada com a Legislação Estadual LEI Nº 11.714, de 10/04/2024, que trata da Política Estadual de Incentivo à Economia do Mar como estratégia de desenvolvimento socioeconômico do Estado do Rio Grande do Norte.

Planejamento Espacial Marinho (PEM) e energia eólica offshore no Nordeste

O Planejamento Espacial Marinho no Nordeste é uma política pública feita por muitas mãos, de acordo com Eduardo Lacerda, Geógrafo pela Universidade do Estado do Ceará (UECE), Doutor em Ciências Marinhas Tropicais e representante do Ceará no Comitê do Programa Espacial Marinho (PEM). “Hoje o grande esforço é ressaltar a importância da Amazônia Azul e realizar o ordenamento das várias atividades que ocorrem nesse espaço, para que ocorram de forma conjunta e fortalecê-las.” (Lacerda,2025)

Em suas várias abas, destaca as Unidades de Conservação existentes no Nordeste (marinhas e costeiras), as áreas de exploração de petróleo e gás (plataformas), áreas existentes e potenciais para mineração, torres eólicas onshore e linhas de transmissão, parque eólicos em processo de licenciamento, pesca artesanal e colônias de pescadores, rotas de navegação, presença de fauna e pesca industrial. Então, a Amazônia Azul tem várias atividades que utilizam essa área e ao mesmo tempo por vários setores.

As atividades mencionadas ocorrem ao longo de todo país e há aquelas que podem causar impactos no ambiente costeiro e marinho: sobrepesca e pesca destrutiva, resíduos sólidos (plásticos),contaminação urbana e industrial,degradação de habitats, turismo e ocupação desordenados, geração de energia eólica offshore sem planejamento, impactos decorrentes da extração de recursos naturais e junto à isso ocorrem as mudanças climáticas, com o risco de perder os ecossistemas e biodiversidade e tudo isso afetar o bem estar humano. (Lacerda,2025)

O geógrafo reforçou durante o Encontro XV Geopolíticas, transmitido através do Youtube, a importância do planejamento, ordenamento e gestão das atividades para que ocorram de forma ordenada, vendo aquelas que possuem sinergia entre si e podem ocorrer de forma conjunta. Daí a importância do PEM, um processo público de ordenamento das atividades humanas no ambiente marinho a fim de alcançar objetivos ecológicos, econômicos e sociais que são especificados através de um processo público. Funciona como o processo de organização do uso no mar e oferece caminhos para o ordenamento e as diretrizes no Brasil.

UK GOVERNMENT, 2022 (apud FUNPEC RN,2025) PEM Nordeste, aponta que a viabilidade da energia eólica depende da estrutura portuária da região, destacando-se os portos de Natal(RN), Pecém(CE) e Suape (PE) para funcionar como hubs na região. O estudo sobre as cadeias eólicas offshore no Brasil destaca como gargalos: falta de infraestrutura portuária, baixa integração entre pesquisa e desenvolvimento e o setor privado e a falta de mão de obra qualificada.

Durante o Encontro XV Geopolíticas - Congresso em Geopolíticas e Transição Energética - II Workshop Margem Equatorial, realizado em novembro de 2025, em

Fortaleza, o pesquisador do ISI e coordenador do setor de Geotecnologias, Raniere Rodrigues, destacou em sua fala a atuação do PDI: Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação aplicado na indústria. Eles desenvolvem pesquisas com materiais, equipamentos para o setor industrial e cada instituição relacionado com o potencial da sua região. No Rio Grande do Norte, ele destaca o potencial em energia solar, eólica e sustentabilidade.

Não há um projeto de eólica offshore em operação no Brasil e o projeto piloto visa dar direcionamento para que as empresas possam explorar essa atividade. É necessária a formulação de projetos e identificação das tecnologias adaptadas à realidade brasileira, para alcançar respostas ao setor com a realização de testes nas condições do clima do país. (Rodrigues, 2025). Existem vários processos tramitando no IBAMA, conforme a figura 07.

.

Figura 07 : Processos de licenciamento ambiental de eólicas offshore tramitando no IBAMA.

Fonte: IBAMA https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20260303_Eolicas_Offshore_Ibama_fevereiro_26.pdf

Figura 08: Como está estruturada a planta piloto

Fonte: SENAI/RN

Conforme a figura 08, o projeto apresentado pelo representante do Senai RN está estruturado para funcionar com dois aerogeradores, de 8,5 Megawatts e 16 MW próximo ao Porto Ilha, terminal salineiro em Areia Branca-RN, conectados ao porto por cabos submarinos e que irão fornecer energia para as atividades desenvolvidas. Será ofertada energia para essa importante atividade econômica do RN.

A escolha considera os aspectos da região: as correntes e a profundidade do mar e o mapeamento ambiental participativo realizado junto à comunidade. São estimados de 1 a 2 anos para o estudo, 2 anos para construção e 25 anos em operação, tempo de vida útil das turbinas. O estudo é feito em várias etapas e compreende: caracterização do projeto; diagnóstico ambiental envolvendo os meios físico, biótico e socioeconômico; avaliação dos impactos ambientais, ações recomendações, programas ambientais e a conclusão e viabilidade ambiental.(Rodrigues, 2025)

Conclusão

Segundo os resultados obtidos, destaca-se que o Marco Legal das Eólicas Offshore estabelece os critérios de concessão de áreas marítimas de exploração para atrair investimentos e as áreas protegidas pela legislação ambiental. Além disso, foi emitida

recentemente a nova metodologia pelo Ministério de Minas e Energia, o procedimento padrão para seleção de áreas de geração de energia offshore, alinhada com o marco regulatório e com o uso do espaço marinho. A lei municipal de Areia Branca/RN está alinhada com a Política Estadual de Incentivo à Economia do Mar do RN e faz-se necessário o diálogo com as comunidades locais envolvidas.

O Termo de referência determina os critérios e a necessidade de realização do Estudo de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) para subsidiar o prévio licenciamento, sendo pertinente o detalhamento dos aspectos ambientais do diagnóstico. Aliado ao desenvolvimento sustentável local, o município de Areia Branca está debatendo a criação de uma nova área de proteção ambiental (APA), unidade de conservação para ampliar as áreas marinhas protegidas, e isso atende à exigência do mapeamento das áreas prioritárias de conservação para a instalação dos projetos eólicos offshore.

Com o intuito de colaborar com a produção de dados sobre a geração de energia eólica offshore, o recente acordo entre o Comando do 3º Distrito Naval da Marinha do Brasil e o SENAI RN para ações de pesquisa, como a implantação da Plataforma de Coleta de dados Meteoceanográficos, possibilitará maiores conhecimentos sobre os ventos, ondas e correntes marítimas, condições ambientais da costa do estado e capacitação profissional para essa atividade e monitoramento dos oceanos.

Precisam ser continuamente monitorados vários aspectos, por exemplo: físicos (aumento da turbidez, qualidade da água, alterações no leito do mar e linha de costa); bióticos (rotas de aves, tartarugas marinhas, ictiofauna, ruídos e vibrações, iluminação artificial com seus efeitos sobre os animais e na paisagem) e socioeconômicos: (atividades pesqueiras,turísticas, navegação, presença dos aerogeradores e suas movimentações e as geração de energia, empregos e impostos e geração de resíduos). Dados ambientais para a elaboração dos estudos podem ser consultados em: CODERN, EMPARN, IBAMA, ICMBIO e projeto TAMAR, INMET, IPHAN, Marinha, Plataforma de Energias do RN, SEDEC/RN e pretende-se dar continuidade à pesquisa avaliando os dados ambientais disponíveis na região de Areia Branca /RN desses órgãos e afins.

Os dados ambientais devem ser levantados pelo empreendedor (dados primários) ou podem ser secundários, a partir de estudos realizados conforme as exigências do TR do IBAMA. Outros dados (secundários) podem ser acessados em sites de órgãos governamentais. Diante da falta de dados ambientais locais, sugere-se o acompanhamento dos programas de monitoramento ambiental do sítio de testes do SENAI RN condicionados no processo de licenciamento ambiental relacionados ao meio físico.

Referências

ARANTES, Guilherme Oliveira.Souza,Renato Santos de.PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE E AS PERSPECTIVAS PARA O BRASIL. Rio de Janeiro, RJ. BNDES, março,2025. Disponivel em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/28051/3/PRArt_216557_Panorama%20da%20energia%20e%C3%B3lica%20offshore__.pdf Acesso em julho/2026.

AREIA BRANCA(RN),Prefeitura Municipal. Economia. Disponível em: https://areiabranca.rn.gov.br/economia/. Acesso em abril/2026.

AREIA BRANCA (RN). Lei nº 1.700, de 5 de dezembro de 2025. Cria a Política Municipal de Incentivo à Economia do Mar como estratégia de desenvolvimento socioeconômico do Município de Areia Branca, na forma que menciona. Areia Branca, RN: Câmara Municipal, 2025. Disponível em: https://areiabranca.rn.gov.br/midia/doc/2LJKPF6Q0.pdf. Acesso em: 19 mar. 2026.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Sistema de Informação Geográfica da Mineração.(SIGMINE). Brasília,DF. Disponível em:https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908. Acesso em 26/08/2026.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Termo de Referência, Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental EIA/Rima Tipologia: Complexos Eólicos Marítimos (Offshore). Brasília, DF: IBAMA, 2020. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/publicacoes/2020-11-TR_CEM.pdf. Acesso em: 8 out. 2025.

BRASIL. Decreto nº 10.946, de 25 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a cessão de uso de espaços físicos e o aproveitamento dos recursos naturais em águas interiores de domínio da União, no mar territorial, na zona econômica exclusiva e na plataforma continental para a geração de energia elétrica a partir de empreendimento offshore. Brasília, DF: Presidência da República, [2022]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/Decreto/D10946.htm. Acesso em: 8 jun. 2026.

BRASIL. Lei nº 15.097, de 10 de janeiro de 2025. Disciplina o aproveitamento de potencial energético offshore e altera as Leis nºs 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 10.438, de 26 de abril de 2002, 14.182, de 12 de julho de 2021, e 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Brasília, DF: Presidência da República, [2025]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/l15097.htm. Acesso em: 8 out. 2025.

BRASILEIRO, Ada. 2026.Como produzir textos acadêmicos e científicos. 1 ed., 3ª reimpressão-São Paulo. Editora Contexto,2026.

ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Guia de licenciamento tartarugas marinhas : diretrizes para avaliação e mitigação de impactos de empreendimentos costeiros e marinhos / Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade (DIBIO). -- Brasília, DF: ICMBio, 2017.

ISIER. Instituto SENAI de Inovação Energias Renováveis. Plataforma de Energias do Rio Grande do Norte. Natal: ISI-ER, 2025. Disponível em: https://www.plataformadeenergiasrn.com.br.

LACERDA, Eduardo. FEBRAGEO: XV Geopolíticas - Mesa de Debates: Transição Energética e Oportunidades na Margem Equatorial, plataforma Youtube, 19 de novembro de 2025, disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=QIGnIAYlrNE&t=859s duração: (2:01:50), acesso em 26/11/25.

MARINHA DO BRASIL. Amazônia Azul.Comissão Interministerial para os Recursos do mar. Publicado em 25/07/2017 e atualizado em 15/06/2026. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/secirm/pt-br/assuntos/noticias/noticias-psrm/2017/07/amazonia-azul. Acesso em 16/06/2026.

MARINHA DO BRASIL. Com3ºDN e SENAI-RN firmam parceria estratégica para monitoramento meteoceanográfico da costa potiguar. Publicado e atualizado em 09/06/2026. Disponível em:

https://www.marinha.mil.br/com3dn/content/com3odn-e-senai-rn-firmam-parceria-estrategica-para-monitoramento-meteoceanografico-da. Acesso em agosto de 2026.

MARINHA DO BRASIL. Planejamento Espacial Marinho-PEM: Região Nordeste do Brasil Caderno de Energias Renováveis. Versão preliminar,2025.Disponível em: https://www.marinha.mil.br/secirm/psrm/pem/cadernos-setoriais-pem-nordeste, acesso em 19/01/2026.

RIO GRANDE DO NORTE. Lei nº 6.950, de 20 de agosto de 1996. Dispõe sobre o Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro e dá outras providências. Disponível em: https://leisestaduais.com.br/rn/lei-ordinaria-n-6950-1996-rio-grande-do-norte-dispoe-sobre-o-plano-estadual-de-gerenciamento-costeiro-e-da-outras-providencias. Acesso em março/2026.

RIO GRANDE DO NORTE. Lei nº 11.714, de 10 de abril de 2024. Cria a Política Estadual de Incentivo à Economia do Mar como estratégia de desenvolvimento socioeconômico do Estado do Rio Grande do Norte, na forma que menciona. Natal, RN: Assembleia Legislativa, 2024. Disponível em: https://www.al.rn.leg.br/storage/legislacao/2024/l7l65eisodd4w7tvol7edandpfs0is.pdf.

Acesso em: 18 mar. 2026.

RODRIGUES, Ranieri. FEBRAGEO: XV Geopolíticas - Mesa de Debates: Transição Energética e Oportunidades na Margem Equatorial, plataforma Youtube, 19 de novembro de 2025, disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=QIGnIAYlrNE&t=859s duração: (2:01:50), acesso em 26/11/25.

SENAI RN.Projeto da 1ª planta piloto offshore do Brasil avança no RN, com apresentação à comunidade. Disponível em: https://www.rn.senai.br/projeto-da-1a-

planta-piloto-offshore-brasil-avanca-no-rn-com-apresentacao-comunidade/. Acesso em agosto/26.

SILVA, S. L. P.; COSTA, W. P. L. B.; SILVA, J. D.; NASCIMENTOS, I. C. S.; PEDROSA, C. K. A. A indústria salineira do Rio Grande do Norte: análise de fatores para o desenvolvimento. R. Bras. Planej. Desenv. Curitiba, v. 12, n. 02, p. 292-323, mai./ago. 2023. Disponível em:https://periodicos.utfpr.edu.br/rbpd. Acesso em agosto/2026.

VITAL H, GOMES MP, TABOSA WF, FRAZÃO EP, SANTOS CLA, PLÁCIDO JUNIOR JS. 2010. Characterization Of The Brazilian Continental Shelf Adjacent To Rio Grande Do Norte State, NE Brazil. Brazilian Journal of Oceanography, 58(special issue, IGCP526):43-54. Acesso em 20/04/20206.

Anexos

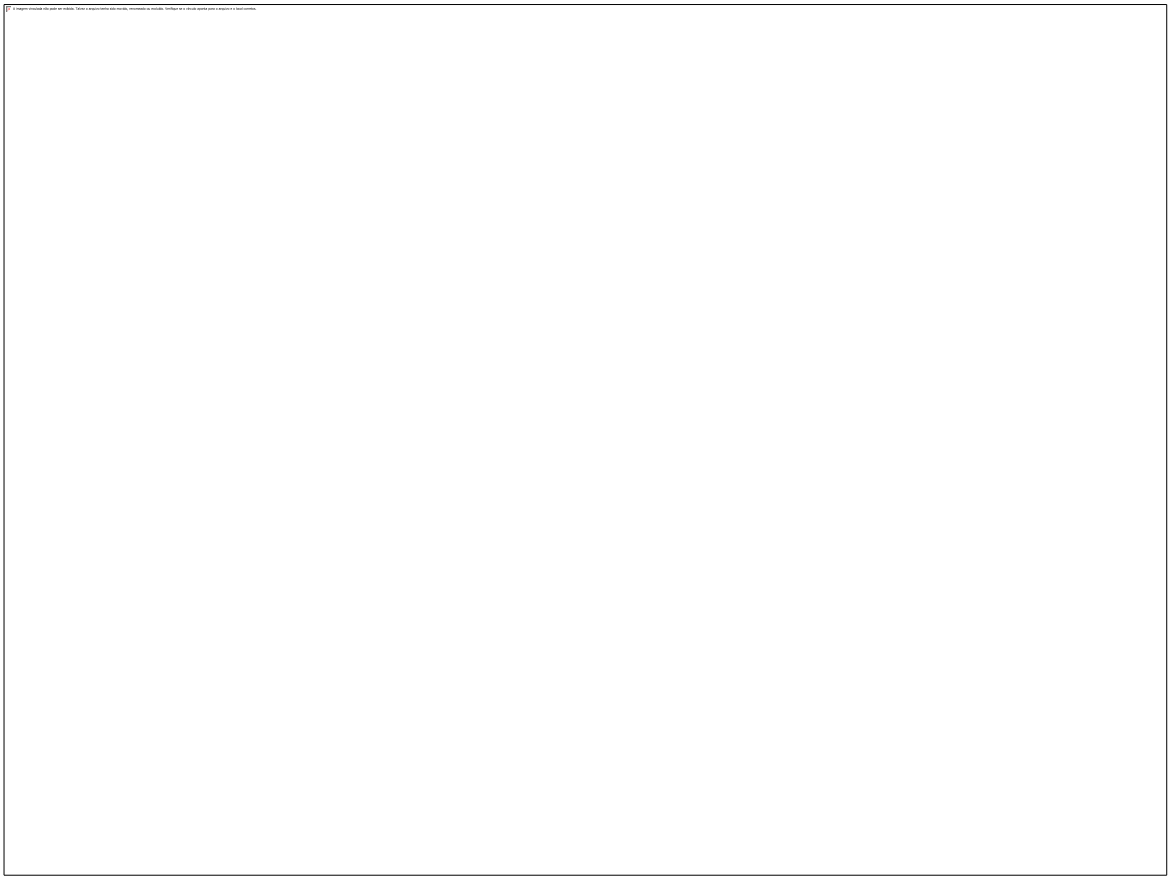


Figura 01: Processos minerários de calcário em Areia Branca/RN: polígonos bege, requerimento de lavra, autorização de pesquisa, polígonos azuis. Fonte: Agência Nacional de Mineração(ANM) (2026)

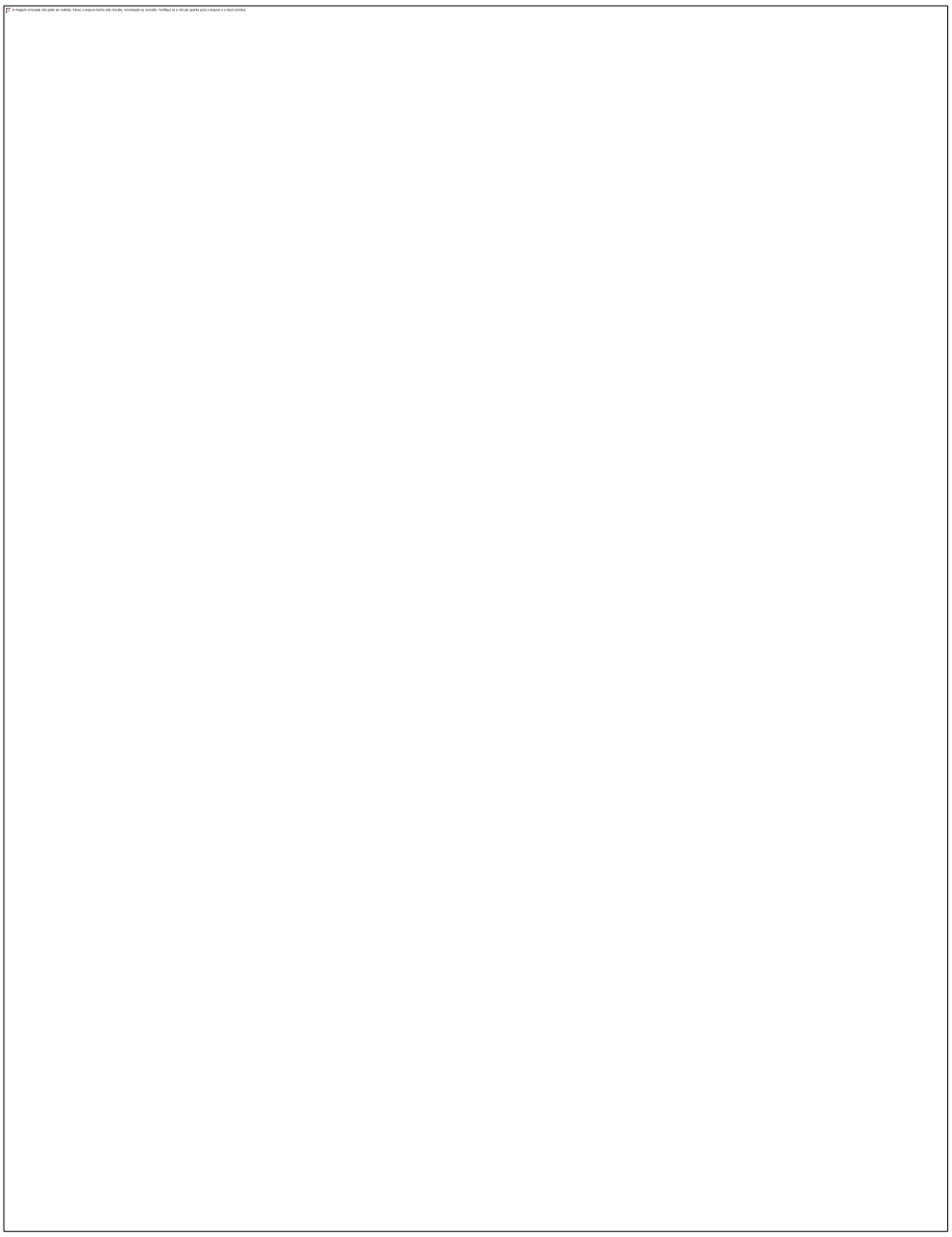


Figura 02: Aspectos ambientais Fonte: Termo de referência IBAMA(2020)

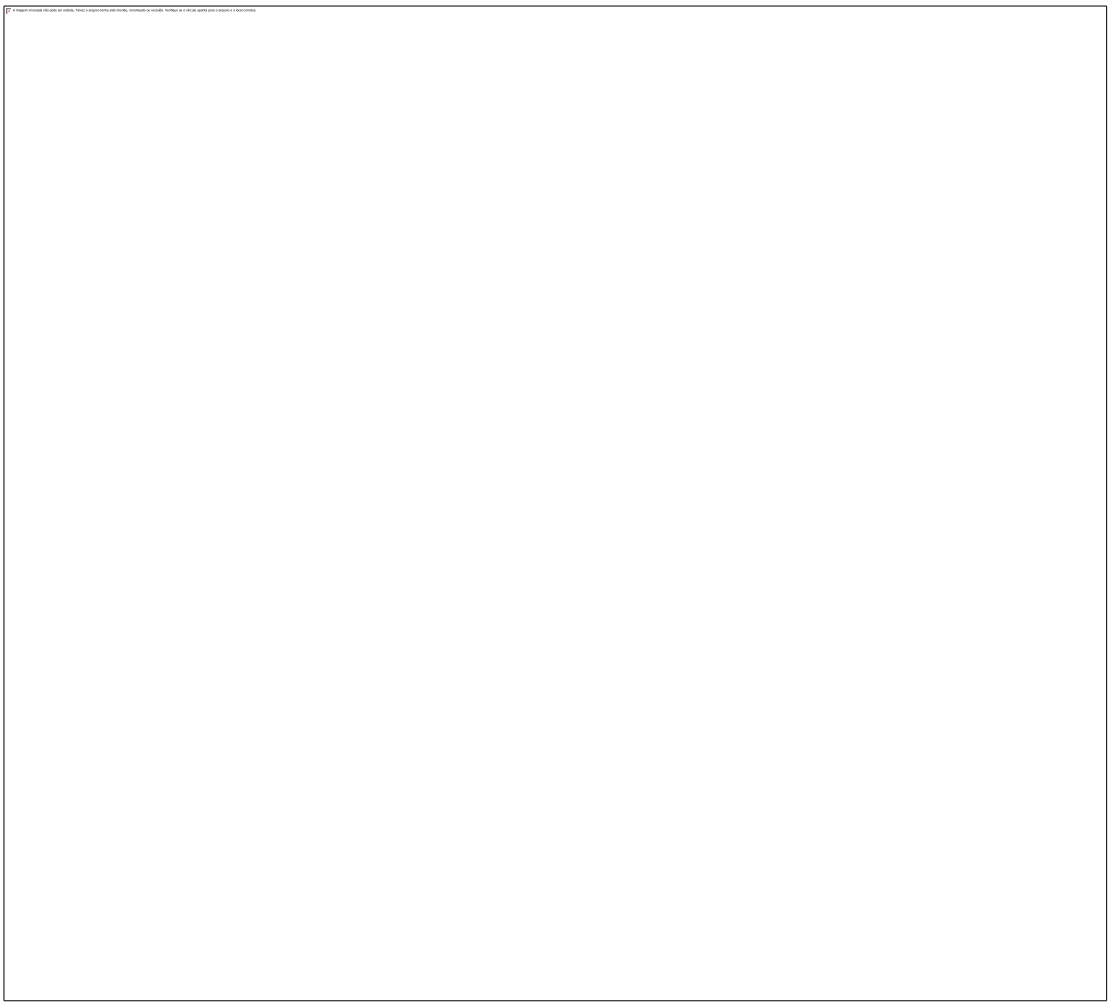


Figura 03: Decreto 10946/22

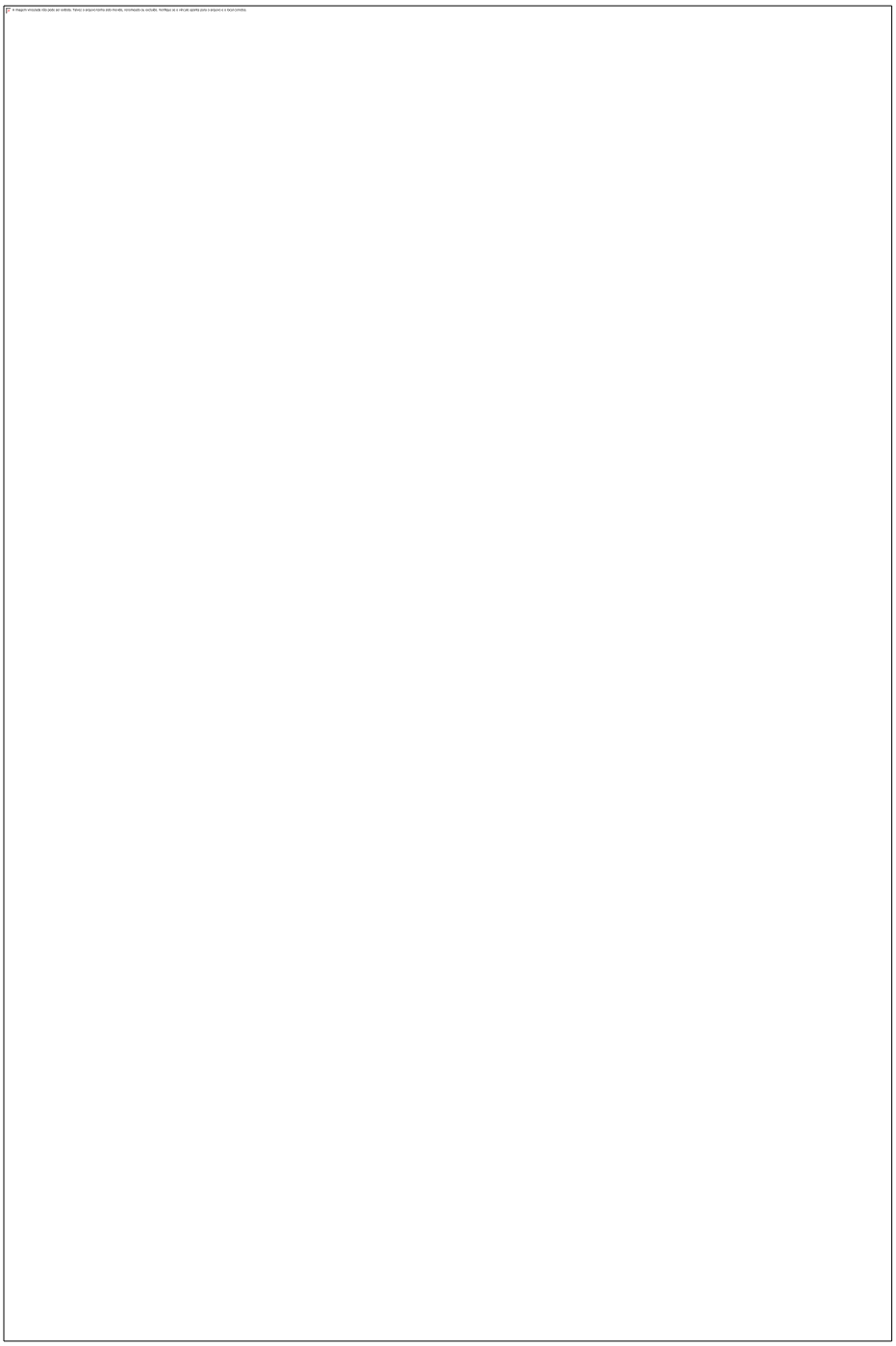


Figura 04: Cessão de uso de bens da União para geração de energia elétrica (offshore) Lei 15.097/25

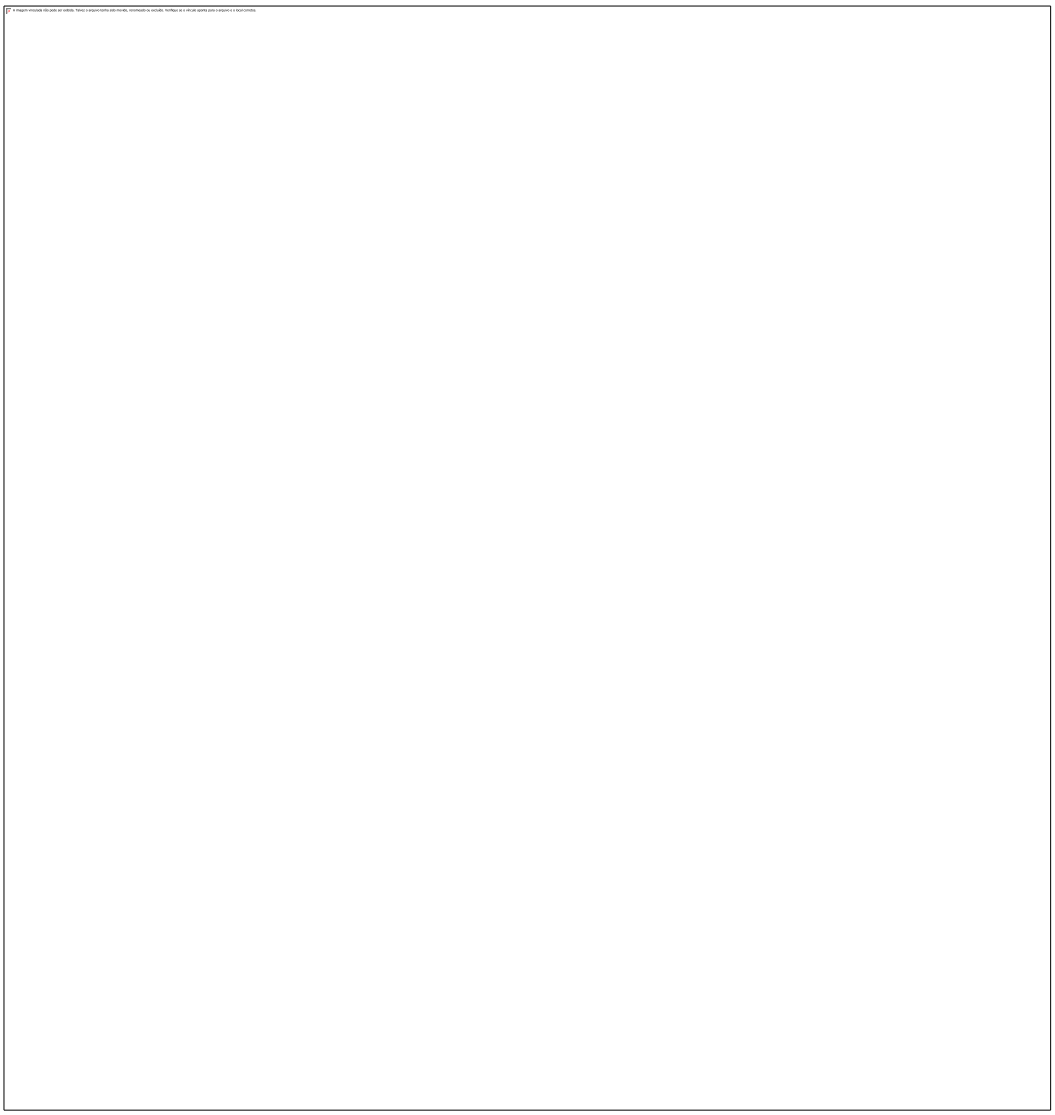


Figura 05: Distribuição das participações governamentais (proporcional) com base na Lei 15.097/25 (Artigo 14) Fonte: elaborado pelo autor (2026)

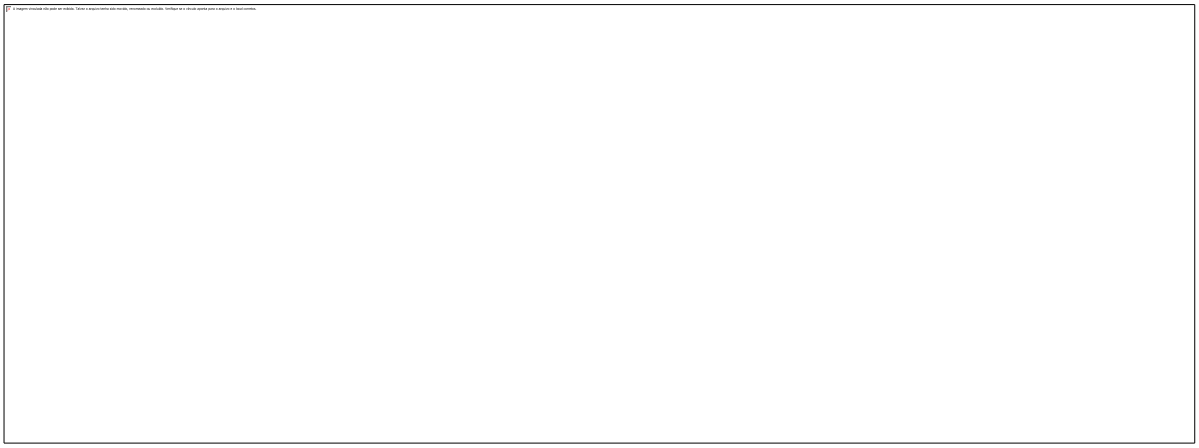


Figura 06: Projetos no RN com processo de licenciamento ambiental tramitando no IBAMA (atualizado em 27/02/2026). Fonte: IBAMA

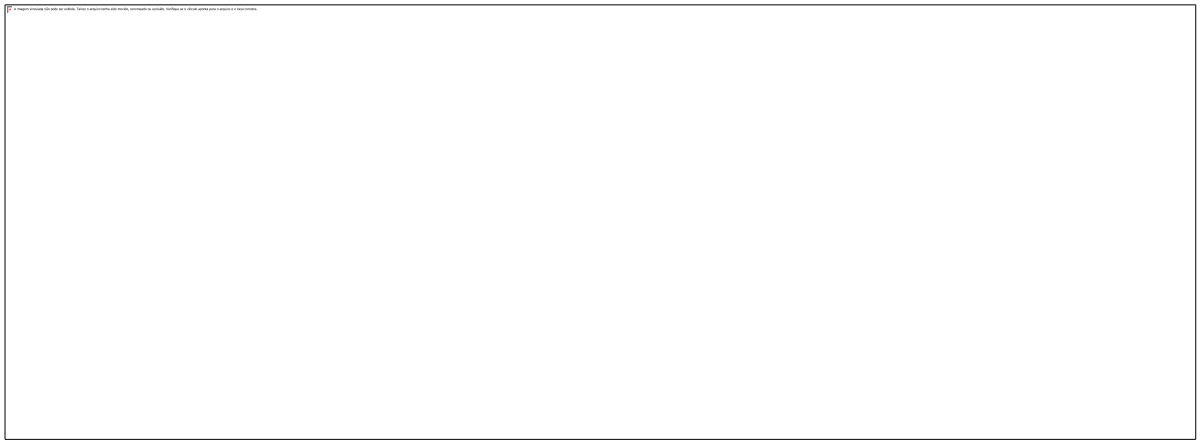


Figura 07 : Processos de licenciamento ambiental de eólicas offshore tramitando no IBAMA. Fonte: IBAMA https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20260303_Eolicas_Offshore_Ibama_fevereiro_26.pdf

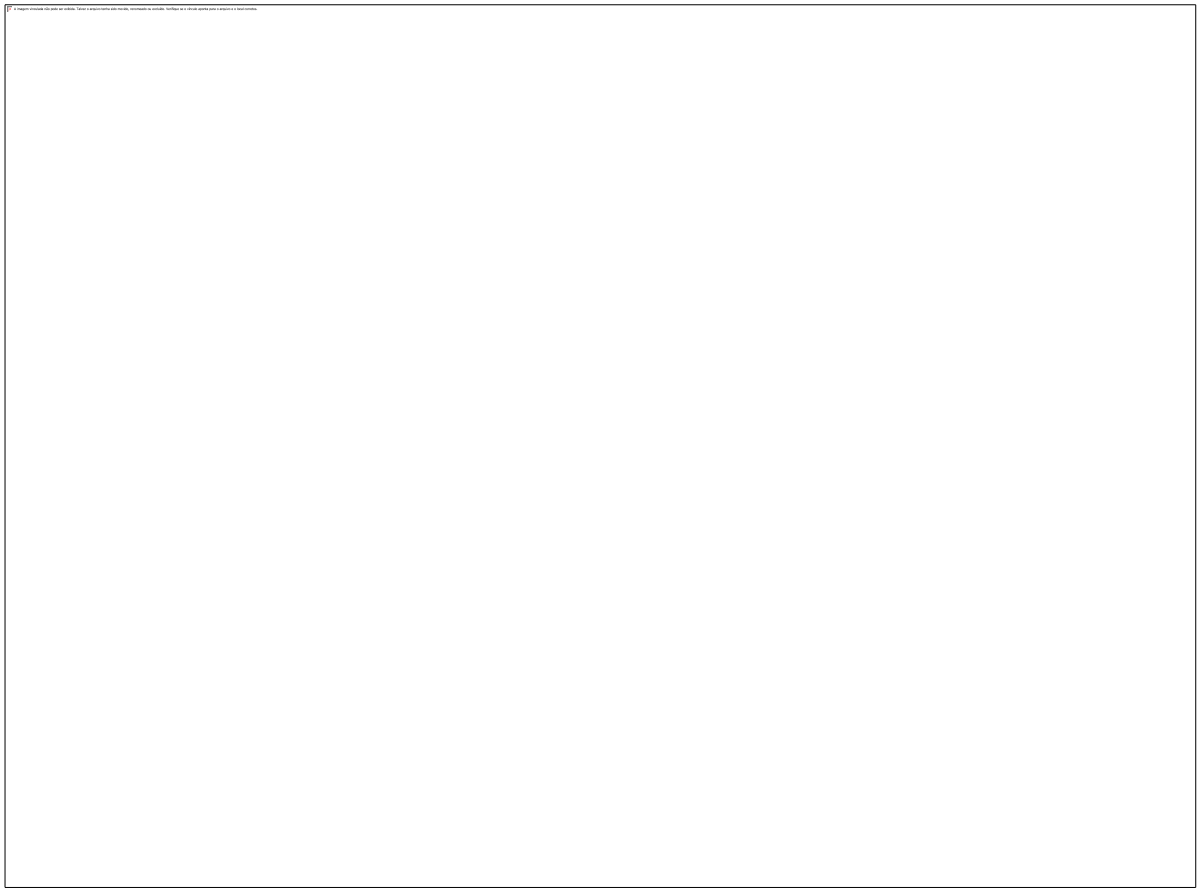


Figura 08: Como está estruturada a planta piloto Fonte: SENAI/RN

CÓDIGO: ET0967

AUTOR: MARIA JEANGELA PAULA FERREIRA

ORIENTADOR: CAMILA PACELLY BRANDÃO DE ARAÚJO

TÍTULO: Estudo da atividade catalítica de nanomateriais à base de metais refratários para armazenamento de H2 por hidrogenação de fase orgânica

Resumo

O hidrogênio apresenta elevado potencial como vetor energético para a transição para uma matriz de baixo carbono. Entretanto, seu armazenamento ainda representa um desafio tecnológico devido às condições necessárias nos métodos convencionais de compressão e liquefação. Uma alternativa é o armazenamento químico em compostos orgânicos líquidos, nos quais o hidrogênio pode ser incorporado por reações de hidrogenação e posteriormente liberado por desidrogenação. Nesse contexto, nanomateriais à base de metais refratários apresentam propriedades promissoras para aplicação como catalisadores heterogêneos. Este trabalho tem como objetivo estudar a obtenção e caracterização de materiais à base de molibdênio e tungstênio visando sua posterior aplicação em reações de hidrogenação de compostos orgânicos para armazenamento de hidrogênio em fase líquida. O estudo contempla a síntese e caracterização de óxidos e, posteriormente, carbetos desses metais, além da avaliação de alumina, carvão ativado e óxido de grafeno reduzido como suportes catalíticos. A caracterização estrutural dos materiais é realizada por difração de raios X (DRX), permitindo a identificação das fases cristalinas presentes. Os resultados obtidos contribuirão para a seleção e desenvolvimento de materiais catalíticos destinados a processos de armazenamento químico de hidrogênio.

Palavras-chave: Hidrogênio. Catálise. Molibdênio. Tungstênio. Hidrogenação.

TITLE: Study of the Catalytic Activity of Refractory Metal-Based Nanomaterials for H_2 Storage through Organic-Phase Hydrogenation

Abstract

Hydrogen has significant potential as an energy carrier for the transition toward a low-carbon energy system. However, its storage remains a technological challenge due to the demanding conditions associated with conventional compression and liquefaction methods. An alternative is chemical storage in liquid organic compounds, in which hydrogen can be incorporated through hydrogenation reactions and subsequently released through dehydrogenation. In

this context, refractory metal-based nanomaterials exhibit promising properties for application as heterogeneous catalysts. This work aims to investigate the preparation and characterization of molybdenum- and tungsten-based materials for their subsequent application in hydrogenation reactions of organic compounds for liquid-phase hydrogen storage. The study includes the synthesis and characterization of oxides and, subsequently, carbides of these metals, as well as the evaluation of alumina, activated carbon, and reduced graphene oxide as catalyst supports. Structural characterization is performed by X-ray diffraction (XRD), enabling the identification of crystalline phases. The results are expected to contribute to the selection and development of catalytic materials for chemical hydrogen storage processes.

Keywords: Hydrogen. Catalysis. Molybdenum. Tungsten. Hydrogenation.

Introdução

O hidrogênio tem se destacado como um importante vetor energético para a transição em direção a uma matriz de baixo carbono, devido à sua versatilidade e possibilidade de aplicação em diferentes setores. Entretanto, sua utilização em larga escala ainda depende do desenvolvimento de tecnologias capazes de superar desafios relacionados principalmente ao armazenamento e transporte.

Diferentes estratégias podem ser empregadas para o armazenamento de hidrogênio. Na compressão gasosa, o gás é acondicionado em recipientes submetidos a elevadas pressões, enquanto a liquefação requer temperaturas próximas a -253 °C e elevado consumo energético. Outra possibilidade consiste na adsorção em materiais porosos. Apesar dos avanços alcançados, as limitações associadas a essas tecnologias estimulam a investigação de novos materiais e processos que possam contribuir para o desenvolvimento de alternativas eficientes para o armazenamento de hidrogênio (Rusman e Dahari, 2023).

Nesse contexto, materiais à base de metais refratários apresentam propriedades físico-químicas de interesse tecnológico. Elementos como molibdênio e tungstênio podem formar óxidos, carbetos e nitretos com características relevantes para diferentes aplicações, principalmente quando produzidos em escala nanométrica. A multivalência desses metais permite a ocorrência de diferentes estados de oxidação e processos de oxirredução em suas superfícies, característica importante para aplicações catalíticas.

Óxidos de molibdênio e tungstênio apresentam propriedades estruturais e químicas que justificam seu estudo como materiais de interesse tecnológico e como precursores para obtenção de outras fases à base de metais refratários. A identificação das fases cristalinas formadas durante sua obtenção é, portanto, uma etapa importante para compreender as características dos materiais produzidos e avaliar seu potencial para aplicações posteriores.

Além das fases contendo metais refratários, a alumina apresenta características que justificam sua utilização como material de suporte, sendo amplamente

empregada em sistemas catalíticos devido às suas propriedades estruturais e superficiais. Dessa maneira, conhecer previamente sua estrutura cristalina é importante para compreender suas características e possibilitar comparações posteriores.

Neste trabalho, a difração de raios X (DRX) é utilizada para caracterizar estruturalmente os materiais estudados, permitindo identificar as fases cristalinas presentes a partir da comparação dos picos experimentais com padrões cristalográficos de referência. A caracterização estrutural é complementada pela análise morfológica por microscopia dos materiais para os quais essas imagens foram obtidas.

Assim, o presente estudo concentra-se na síntese e caracterização dos materiais efetivamente obtidos, com ênfase na identificação de suas fases cristalinas, características estruturais e morfológicas e na discussão do potencial associado às propriedades apresentadas por cada material.

Metodologia

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi realizado no Laboratório de Materiais Nanoestruturados e Reatores Catalíticos (LAMNRC), vinculado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). As atividades desenvolvidas concentraram-se na obtenção de materiais à base dos metais refratários molibdênio e tungstênio e na caracterização estrutural das amostras produzidas, além da caracterização da alumina utilizada no estudo.

Obtenção dos materiais à base de molibdênio e tungstênio

Os materiais à base de molibdênio e tungstênio foram obtidos a partir do tratamento térmico de seus respectivos precursores. Essa etapa foi realizada em forno mufla, empregando condições específicas de temperatura, taxa de aquecimento e tempo de permanência para cada material.

Para a obtenção da amostra à base de molibdênio (OM1), o precursor foi submetido a uma taxa de aquecimento de 5 °C/min, até atingir a temperatura de 450 °C. Após alcançar a temperatura estabelecida, o material foi mantido nessa condição durante 120 minutos. Ao final do tratamento térmico, a amostra obtida foi destinada à etapa de caracterização estrutural.

Para a obtenção da amostra à base de tungstênio (OT1), foi empregada uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, até atingir a temperatura de 500 °C, sendo o material mantido nessa temperatura durante 90 minutos. Após o tratamento térmico, a amostra obtida também foi destinada à caracterização estrutural.

As condições de tratamento térmico foram estabelecidas de acordo com os procedimentos definidos para a obtenção de cada material. A identificação das fases efetivamente formadas foi posteriormente realizada por meio da caracterização por difração de raios X.

A alumina (AL1) também foi analisada durante o desenvolvimento do trabalho. Sua caracterização foi realizada com o objetivo de obter informações sobre sua estrutura cristalina e estabelecer as características do material empregado como suporte no estudo.

Caracterização por difração de raios X

A caracterização estrutural das amostras foi realizada por difração de raios X (DRX). Foram analisadas a alumina (AL1), a amostra à base de molibdênio (OM1) e a amostra à base de tungstênio (OT1). A técnica foi empregada para avaliar as características cristalinas dos materiais e possibilitar a identificação das fases presentes nas amostras.

Os difratogramas experimentais foram analisados utilizando o software X'Pert HighScore Plus. Inicialmente, foi realizado o tratamento da linha de fundo (background) dos difratogramas, seguido pela identificação dos picos de difração presentes em cada amostra. Esse procedimento permitiu determinar as principais reflexões experimentais utilizadas posteriormente na identificação das fases cristalinas.

Em seguida, foi utilizada a ferramenta Search & Match do HighScore Plus para realizar a comparação entre os picos observados experimentalmente e os padrões cristalográficos disponíveis no banco de dados associado ao programa. Durante a análise, foram consideradas as composições químicas esperadas para cada material, possibilitando direcionar a busca para padrões compatíveis com os elementos presentes nas respectivas amostras.

A identificação das fases cristalinas foi realizada considerando o conjunto de informações obtidas a partir da comparação entre os difratogramas experimentais e os padrões de referência. Foram avaliadas principalmente as posições dos picos em 2θ, suas intensidades relativas, o número de linhas correspondentes e a ocorrência de linhas intensas não correspondentes. As informações cristalográficas apresentadas nas fichas de referência também foram consideradas durante a seleção dos padrões mais adequados para cada amostra.

Os parâmetros apresentados pelo HighScore Plus foram utilizados como informações auxiliares durante o processo de identificação das fases. Valores como Score e fator de escala foram analisados em conjunto com a correspondência entre os picos experimentais e os padrões cristalográficos, evitando a utilização isolada desses parâmetros para a identificação dos materiais.

Após a comparação dos resultados experimentais com os padrões disponíveis, foram selecionadas as fichas que apresentaram maior compatibilidade com cada

difratograma. Para a caracterização dos materiais, foram considerados o nome da fase cristalina identificada, a ficha cristalográfica correspondente e os picos experimentais atribuídos à respectiva fase. Os difratogramas e as identificações realizadas no HighScore Plus foram utilizados posteriormente na apresentação e discussão dos resultados.

Análise dos resultados

Os resultados de DRX foram avaliados individualmente para cada amostra, permitindo analisar as características estruturais da alumina e dos materiais à base de molibdênio e tungstênio. A análise considerou principalmente a presença e a posição das reflexões observadas, a correspondência com os padrões cristalográficos selecionados e as características das fases identificadas.

A partir dessas informações, buscou-se relacionar as condições empregadas na obtenção dos materiais com as fases cristalinas formadas. Os resultados obtidos contribuíram para a compreensão das características estruturais de cada amostra e forneceram informações importantes para a discussão do potencial dos materiais estudados em aplicações de interesse catalítico.

Resultados e Discussões

Os materiais sintetizados foram caracterizados por difração de raios X (DRX) com o objetivo de avaliar suas características estruturais e identificar as fases cristalinas presentes. Os difratogramas foram analisados no software HighScore Plus, utilizando a ferramenta Search & Match, que permite comparar as posições e intensidades dos picos experimentais com padrões cristalográficos disponíveis no banco de dados. A análise foi realizada inicialmente para a alumina utilizada como suporte e, posteriormente, para os materiais contendo molibdênio e tungstênio.

Alumina (Al_2O_3)

O difratograma de raios X da amostra de alumina (AL1) e a comparação com o padrão cristalográfico selecionado pelo HighScore Plus são apresentados na Figura 1.

Figura X (anexado) – Difratograma de raios X da amostra de alumina (AL1) e comparação com o padrão cristalográfico PDF 00-046-1215, realizada no software HighScore Plus.

A análise por Search & Match indicou correspondência da amostra com o óxido de alumínio (Al_2O_3), associado à ficha cristalográfica PDF 00-046-1215. Para o padrão selecionado, foi obtido Score de 58, fator de escala de 0,942 e 12 linhas

correspondentes de um total de 14, sem ocorrência de linhas fortes não correspondentes (Strong Unmatched Lines = 0).

Os picos experimentais atribuídos pelo software à fase identificada foram observados aproximadamente em 2θ = 18,39°; 21,93°; 32,66°; 34,50°; 36,53°; 39,47°; 41,69°; 45,40°; 45,82°; 46,55°; 50,70°; 56,92°; 61,44° e 67,15°. Entre esses sinais, o pico localizado em aproximadamente 67,15° apresentou a maior intensidade relativa. Também foi observado um pico em aproximadamente 77,61°, que não foi atribuído pelo HighScore Plus à ficha cristalográfica selecionada.

A correspondência observada entre os picos experimentais e o padrão de referência confirma a presença de uma fase cristalina de Al_2O_3 na amostra analisada. A ausência de linhas fortes não correspondentes também reforça a compatibilidade entre o difratograma experimental e o padrão selecionado.

A caracterização da alumina é particularmente importante para este estudo, uma vez que esse material foi empregado como suporte para os sistemas contendo molibdênio e tungstênio. Dessa forma, seu perfil de difração funciona como referência para a análise dos materiais modificados, permitindo verificar quais reflexões permanecem relacionadas ao suporte e quais alterações podem estar associadas às espécies incorporadas posteriormente.

Material contendo molibdênio

O difratograma do material contendo molibdênio (Mo) é apresentado na Figura 2. A análise foi realizada no HighScore Plus seguindo o mesmo procedimento empregado para a alumina, com comparação dos sinais experimentais com os padrões cristalográficos disponíveis.

Figura 2 (anexado) – Difratograma de raios X do material contendo molibdênio e identificação das fases por meio do software HighScore Plus.

A interpretação do difratograma desse material deve considerar inicialmente as reflexões provenientes da Al_2O_3 utilizada como suporte. A comparação com o difratograma da alumina permite verificar a permanência dos sinais característicos do suporte e identificar o surgimento de reflexões adicionais após a incorporação das espécies de molibdênio.

Entre as fases de interesse para a análise encontram-se os óxidos de molibdênio, especialmente o trióxido de molibdênio (MoO_3). Entretanto, a atribuição dessa fase ao material deve ser realizada a partir da correspondência efetiva entre os picos experimentais e a respectiva ficha cristalográfica. Dessa maneira, evita-se atribuir ao material uma fase baseada apenas na composição utilizada durante a síntese.

A intensidade e a definição das reflexões associadas às espécies de molibdênio também dependem de fatores como sua concentração, cristalinidade e dispersão sobre o suporte. Assim, sinais de baixa intensidade ou pouco definidos podem estar relacionados a espécies presentes em menor quantidade ou com

reduzido grau de ordenamento cristalino. Consequentemente, a ausência de reflexões intensas de um óxido específico não é, isoladamente, suficiente para concluir pela ausência de molibdênio no material.

Material contendo tungstênio

O material contendo tungstênio (W) também foi caracterizado por DRX, sendo seu difratograma apresentado na Figura 3.

Figura 3 (anexado) – Difratograma de raios X do material contendo tungstênio e identificação das fases por meio do software HighScore Plus.

Assim como para o material contendo molibdênio, a interpretação desse difratograma deve considerar a contribuição da Al_2O_3 utilizada como suporte. A comparação direta entre os perfis permite verificar alterações nas posições e intensidades dos sinais e identificar possíveis reflexões adicionais associadas às espécies contendo tungstênio.

Dentre as fases de interesse encontra-se o trióxido de tungstênio (WO_3). A identificação dessa fase, entretanto, deve ser confirmada pela correspondência entre as reflexões experimentais e o respectivo padrão cristalográfico. A comparação com o difratograma da alumina é fundamental nesse processo, uma vez que parte dos sinais observados no material contendo W pode ser proveniente do próprio suporte.

Da mesma forma que para o molibdênio, a intensidade das reflexões relacionadas às espécies de tungstênio pode ser influenciada pela quantidade incorporada, pela dispersão sobre a superfície da alumina e pelo grau de cristalinidade. Portanto, espécies altamente dispersas ou pouco cristalinas podem produzir reflexões de baixa intensidade, dificultando sua identificação apenas por DRX.

Análise comparativa dos materiais

A análise conjunta dos difratogramas permite estabelecer a alumina como referência estrutural para a interpretação dos materiais contendo Mo e W. Essa comparação é importante porque possibilita distinguir as reflexões relacionadas ao suporte das modificações decorrentes da incorporação das espécies metálicas.

Para a amostra AL1, a correspondência com a ficha PDF 00-046-1215 confirmou a presença de Al_2O_3, fornecendo um perfil de referência para as demais amostras. Nos materiais contendo molibdênio e tungstênio, a identificação de novas fases deve considerar não apenas a presença de novos picos, mas também a correspondência desses sinais com padrões cristalográficos específicos.

Cabe destacar que o Score de 58 obtido para a alumina corresponde ao parâmetro de correspondência fornecido pelo procedimento Search & Match do HighScore Plus. Esse valor não foi interpretado diretamente como percentual de

correlação. Da mesma forma, o fator de escala de 0,942 foi mantido como parâmetro fornecido pelo software, sem conversão para porcentagem.

De maneira geral, os resultados de DRX permitem caracterizar estruturalmente os materiais preparados e estabelecer uma base para a comparação entre o suporte e os sistemas contendo molibdênio e tungstênio. A análise comparativa dos difratogramas é particularmente relevante para verificar as modificações promovidas pela incorporação dos metais e para auxiliar na identificação das fases cristalinas presentes nos materiais sintetizados.

Conclusão

O desenvolvimento deste trabalho permitiu obter e caracterizar materiais à base de metais refratários, com ênfase nos sistemas contendo molibdênio e tungstênio, além da caracterização da alumina utilizada no estudo. A aplicação da difração de raios X mostrou-se importante para avaliar as características estruturais das amostras e identificar as fases cristalinas presentes por meio da comparação dos difratogramas experimentais com padrões cristalográficos de referência.

A análise da alumina (AL1) permitiu identificar reflexões associadas ao óxido de alumínio (Al_2O_3), fornecendo informações importantes sobre a estrutura do material. Sua caracterização é relevante devido ao potencial de utilização da alumina como suporte em sistemas de interesse catalítico, principalmente em função de suas características estruturais e superficiais.

Para o material à base de molibdênio (OM1), o difratograma apresentou picos bem definidos, evidenciando o caráter cristalino da amostra. As análises realizadas no HighScore Plus indicaram correspondência com o trióxido de molibdênio (MoO_3), sendo necessária a consideração conjunta da ficha cristalográfica selecionada, dos picos atribuídos e dos demais parâmetros fornecidos pelo programa para consolidar a identificação da fase. O estudo desse material é relevante devido às propriedades dos compostos à base de molibdênio e ao seu potencial para aplicações de interesse catalítico e como precursor para obtenção de outras fases à base desse metal.

A amostra à base de tungstênio (OT1) também apresentou um perfil de difração característico de material cristalino, com reflexões bem definidas ao longo da região analisada. A comparação com padrões cristalográficos permite estabelecer a fase formada durante o tratamento térmico e compreender melhor as características estruturais do material. Os compostos à base de tungstênio apresentam propriedades que justificam seu estudo, especialmente considerando o potencial desses materiais para diferentes aplicações tecnológicas e catalíticas.

De maneira geral, a utilização do X'Pert HighScore Plus possibilitou realizar o tratamento dos difratogramas e comparar os resultados experimentais com padrões cristalográficos de referência, contribuindo para a identificação e interpretação das fases presentes nas amostras. A análise individual dos materiais permitiu estabelecer diferenças em seus perfis estruturais e reunir informações relevantes sobre as fases obtidas.

Assim, os resultados alcançados contribuem para a compreensão das características estruturais da alumina e dos materiais à base de molibdênio e tungstênio. A caracterização realizada constitui uma etapa importante para o conhecimento dos materiais estudados e para a discussão de seu potencial em aplicações de interesse catalítico, fornecendo uma base para o desenvolvimento e aprofundamento de estudos envolvendo materiais à base de metais refratários.

Referências

1. Cao, J., Ma, Y., Guan, G., Hao, X., Ma, X., Wang, Z., Kusakabe, K., & Abudula, A. (2016). Reaction intermediate species during the steam reforming of methanol over metal modified molybdenum carbide catalysts. Applied Catalysis B: Environmental, 189, 12–18. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.02.021
2. CHENG, J., & HUANG, W. (2010). Effect of cobalt (nickel) content on the catalytic performance of molybdenum carbides in dry-methane reforming. Fuel Processing Technology, 91(2), 185–193. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.09.011
3. 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
4. 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
5. 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
6. Silva, R. R. da. (2017). ANALISE DOS PARAMETROS DE SINTESE DE NBN VIA REAÇÃO GÁS-SÓLIDO. In DISSERTAÇÃO DE MESTRADO (Issue 6).
7. 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
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. Neylon, M. K. K., Choi, S., Kwon, H., Curry, K. E. E., & Thompson, L. T. T. (1999). Catalytic properties of early transition metal nitrides and carbides: n-butane hydrogenolysis, dehydrogenation and isomerization. Applied Catalysis A: General, 183, 253–263. https://doi.org/10.1016/S0926-860X(99)00053-8
10. Manzolini, G., & Tosti, S. (2008). Hydrogen production from ethanol steam reforming : energy efficiency analysis of traditional and membrane processes. International Journal of Hydrogen Energy, 33(20), 5571–5582. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.029
11. MA, Y., GUAN, G., SHI, C., ZHU, A., HAO, X., WANG, Z., KUSAKABE, K., & ABUDULA, A. (2014). Lowtemperature steam reforming of methanol to produce hydrogen over various metal-doped molybdenum carbide catalysts. International Journal of Hydrogen Energy, 39(1), 258–266. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.150
12. Lee, J. S., Locatelli, S., Oyama, S. T., & Boudart, M. (1990). Molybdenum carbide catalysts 3. Turnover rates for the hydrogenolysis of n-butane. Journal of Catalysis, 125(1), 157–170. https://doi.org/10.1016/0021-9517(90)90086-Y
13. 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

Anexos

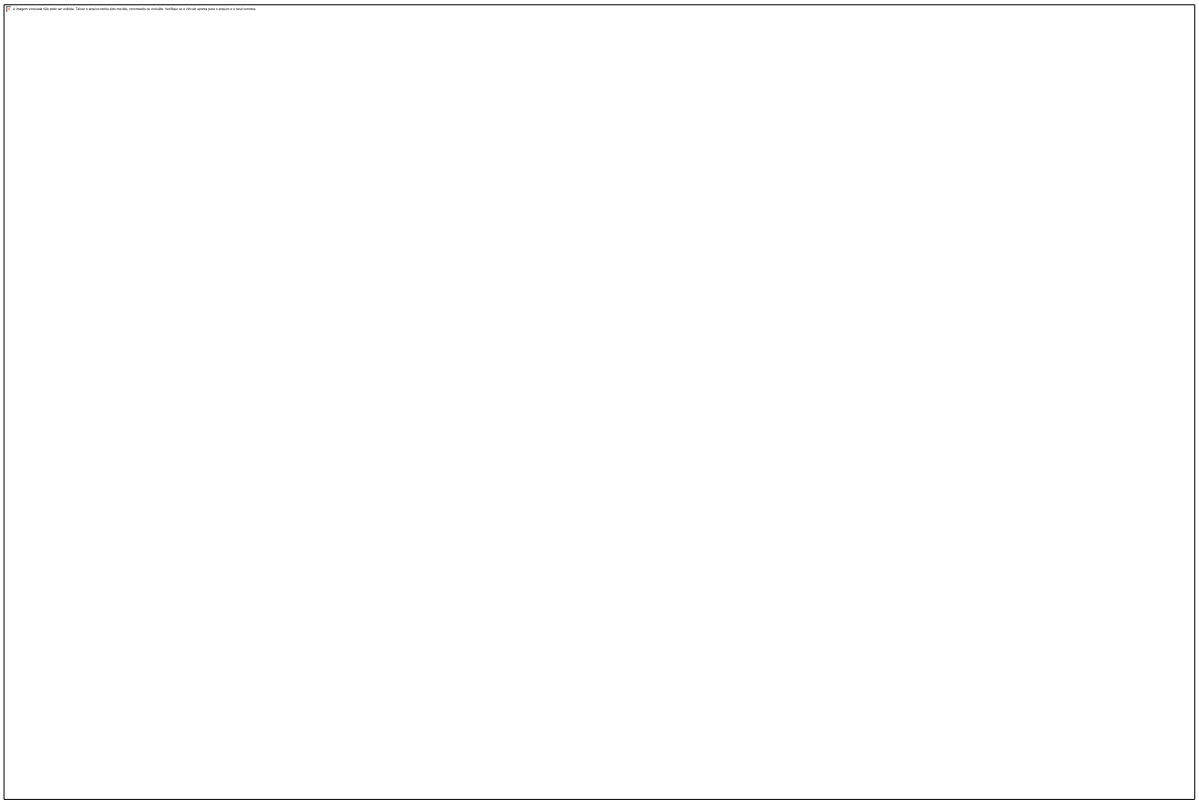


Figura 1

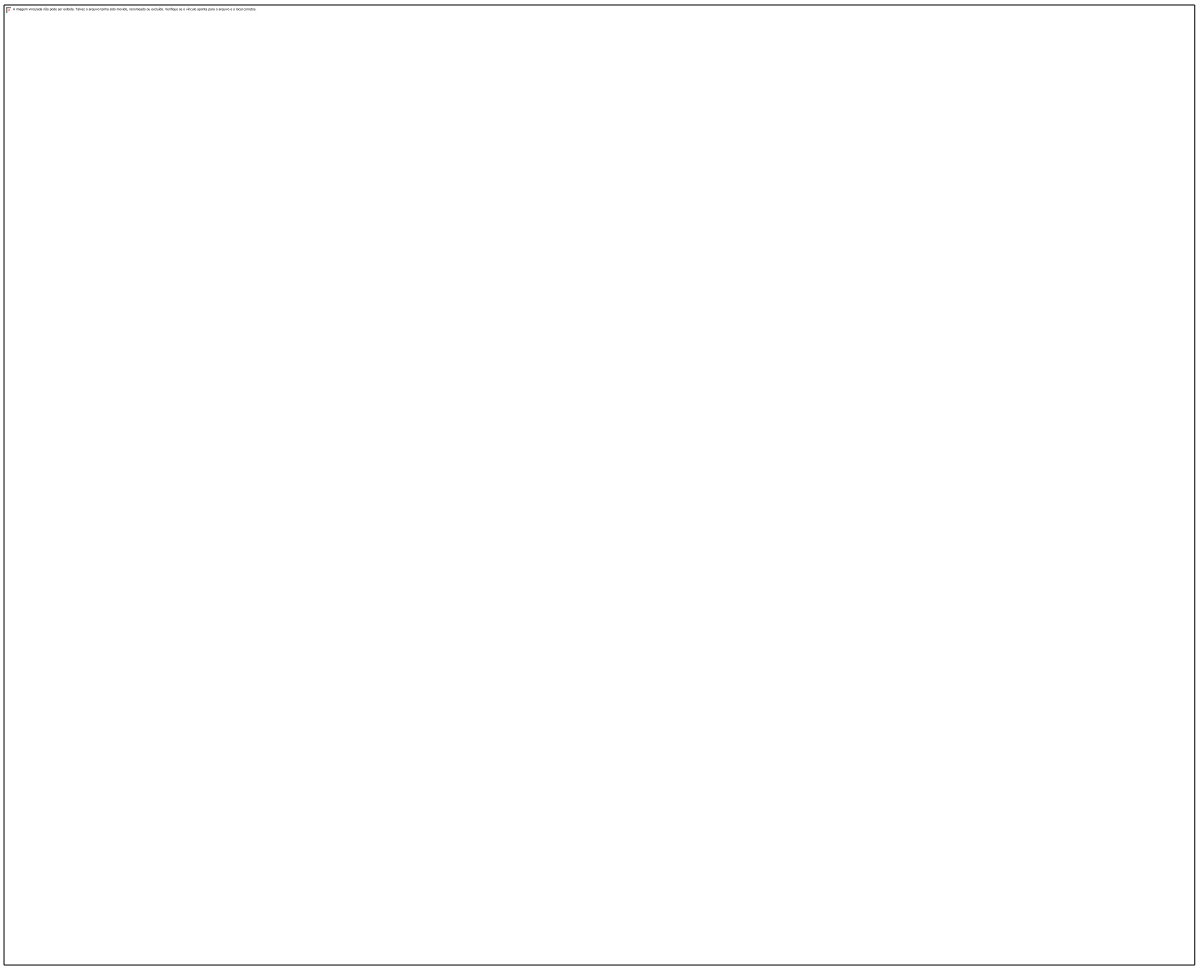


Figura 2

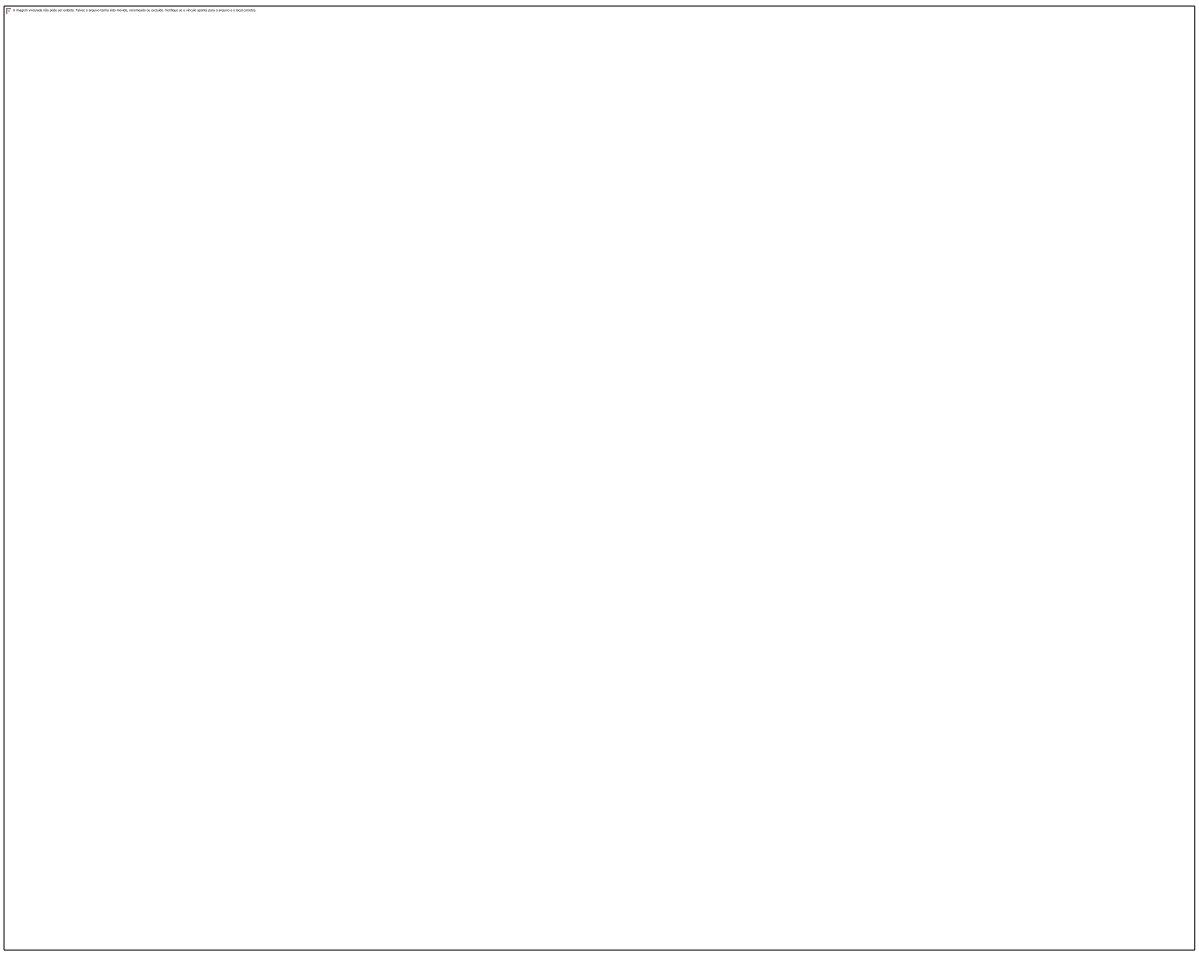


Figura 3

CÓDIGO: ET1022

AUTOR: GABRIEL CABRAL HONOR CATTANEO

ORIENTADOR: JOSE HENRIQUE FERNANDEZ

TÍTULO: Encontros do OVNE (Observatório de Valores do Nordeste) - Expansão da Iniciativa do Café a Vácuo

Resumo

O presente trabalho consistia na realização de matérias científicas e tecnológicas, de modo geral focadas na área aeroespacial, e na realização de eventos de extensão chamados “Encontros do OVNE”, com o objetivo de conscientizar as pessoas, em sua maioria jovens entusiastas, sobre a importância dos setores científicos e tecnológicos para o país, e de inspirá-los a conhecer novas áreas. Para a elaboração das matérias, utilizou-se uma estratégia de criação por etapas, partindo inicialmente da triagem das notícias mais relevantes até sua publicação. Já para os encontros, eram tomadas decisões relacionadas ao local, à data, à hora e aos palestrantes convidados. Ao todo, foram realizadas 11 matérias, em sua maioria sobre temas da área aeroespacial, além da realização de um encontro no IFRN Campus Parnamirim, com a presença de dois profissionais da área e de estudantes interessados no tema. Com os resultados obtidos, o trabalho cumpriu sua função de introduzir jovens interessados aos setores da ciência e tecnologia, ao mesmo tempo em que proporcionou um amadurecimento acadêmico ao bolsista envolvido.

Palavras-chave: Divulgação científica; Área aeroespacial; Nordeste

TITLE: OVNE Meetings (Northeast Values Observatory) - Expansion of the "Café a Vácuo" Initiative

Abstract

The present work consisted of the production of science and technology news articles, generally focused on the aerospace field, and the organization of extension events called "Encontros do OVNE" (OVNE Meetings), aiming to raise awareness among people, mostly young enthusiasts, about the importance of the scientific and technological sectors for the country, and to inspire them to explore new fields. For the production of the articles, a stage-based creation strategy was used, starting with the screening of the

most relevant news items through to their publication. For the meetings, decisions were made regarding venue, date, time, and invited speakers. In total, 11 articles were produced, mostly on aerospace-related topics, in addition to one in-person meeting held at IFRN Campus Parnamirim, with the participation of two professionals from the field and students interested in the subject. Through the results obtained, the work fulfilled its role of introducing interested young people to the fields of science and technology, while also providing meaningful academic growth for the scholarship student involved.

Keywords: Science communication; Aerospace field; Northeast Brazil

Introdução

Com o avanço das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), a forma como adquirimos conhecimento mudou significativamente. As chamadas mídias digitais ou Jornalismo Digital ocuparam um lugar de grande importância nessa nova forma de comunicação e consequentemente na disseminação de novas pesquisas científicas, movimento que ganhou muita força a partir dos anos 2000 e vem crescendo de forma significativa, dada a grande relevância de divulgar ciência de uma forma mais acessível, ciência essa que se relaciona diretamente com a formação de uma cidadania mais informada, capaz de compreender e participar de discussões que envolvem ciência e tecnologia (ALBAGLI, 1996).

Nesse cenário, surge o projeto chamado de Observatório de Valores do Nordeste (OVNE), cujo objetivo primordial é promover a divulgação da ciência e tecnologia de modo geral, focando na área aeroespacial, tentando ao máximo conscientizar as pessoas da importância dessa área e da necessidade de investir neste setor, para que o país se torne independente na área científica e tecnológica, empenhando-se também em tentar despertar novas vocações científicas que um dia guiarão o país.

O projeto cumpre seu papel a partir de duas formas, sendo uma delas a realização e divulgação de matérias no site oficial do projeto sobre pesquisas, pesquisadores e pesquisadoras, iniciativas públicas e privadas sobre desenvolvimentos e avanços de pesquisas, trabalhos e cooperações, sobretudo relacionados ao Nordeste Brasileiro, já o outro consiste na realização dos encontros anteriormente chamados "Café a Vácuo", evento de extensão cujo objetivo era reunir entusiastas e pesquisadores da área aeroespacial, entretanto, o evento passou a se chamar "Encontros do OVNE", voltado agora também para outras áreas da ciência e das tecnologias e não somente para temas aeroespaciais, focado sempre em desempenhar um papel de intermediador entre jovens interessados na área e profissionais dispostos a ensinar, para que assim esses jovens possam ter um contato direto com a área e, quem sabe, poder inspirá-los.

Coube ao bolsista responsável pela realização das matérias o estudo e a pesquisa em diferentes áreas científicas, com o objetivo de selecionar os dados considerados mais importantes para o projeto e assim formular as notícias. Entre os temas abordados, destacam-se medicina aeroespacial, propulsão e estágios de foguetes, além de fenômenos climáticos, como frentes frias. Além disso, o bolsista, junto ao seu orientador e colega de bolsa, ficou encarregado de organizar e realizar os "Encontros do OVNE".

Metodologia

Para a realização das matérias, utilizou-se um método de criação por etapas, sendo essas a triagem, a pesquisa, a elaboração, a revisão e, por fim, a publicação. Cada etapa possuía subpassos e objetivos a serem alcançados para que fosse possível avançar para a próxima etapa sem a presença de lacunas.

Inicialmente, tinha-se a etapa de triagem da matéria. Era nessa etapa que o bolsista selecionava quais notícias eram relevantes e quais não eram para a criação de uma matéria de autoria própria. Para a seleção das notícias, observava-se se o tema tinha alguma importância para o campo científico ou, pelo menos, alguma interligação. Caso fosse confirmado, seguia-se para a etapa de prioridade, que obedecia ao critério de localidade, em que quanto mais local a notícia era, maior sua relevância para o projeto.

Após a conclusão da triagem, avançava-se para a etapa de pesquisa e aprofundamento sobre o referido tema da notícia. Esta era a etapa crucial para a realização de uma boa matéria, nela, estudava-se, a partir de sites ou documentos de autoria confiável, tudo o que se fazia necessário para o entendimento do tema. Após o fim dos estudos, era de grande relevância guardar qualquer tipo de referência que tivesse sido usada para o bolsista compreender o assunto, fossem sites, vídeos ou até mesmo dados de profissionais caso houvesse alguma citação que mais tarde poderia entrar na matéria.

Com a finalização da etapa de pesquisa, possuía-se uma base suficiente para a etapa de elaboração da matéria, a mais importante e a mais demorada entre todas. Era nesse momento que, a partir de subpassos, se construía a matéria de forma detalhada e planejada. Inicialmente, fazia-se o rascunho da matéria de forma breve, selecionando quais informações seriam utilizadas e como ela iria ser estruturada. Com o rascunho pronto, passava-se para a parte mais demorada, a de escrita da matéria. Nesta parte, o bolsista utilizava todos os dados salvos na etapa de pesquisa para formar a parte bruta do texto, porém faltava ainda o devido polimento. Era, então, que se caminhava para o final da etapa de criação, entrando-se na parte de refinamento da matéria. Era nela que se adicionava um título, uma descrição, a marcação das palavras-chave, as imagens e a devida revisão gramatical, utilizando IAs de forma extremamente restrita, focadas somente na correção gramatical, como vírgulas e acentuação. Qualquer erro de lógica ou sentido precisava ser observado pelo próprio bolsista ou pelo orientador na etapa de revisão.

Após a etapa de elaboração terminar, entrava-se nas etapas finais da realização das matérias, sendo a primeira a revisão. Era nessa etapa que o bolsista não ficava mais responsável pela matéria e a entregava já pronta para o seu orientador. O trabalho do orientador era corrigir e verificar a integridade da matéria. Caso fosse encontrado algum erro, ele precisava informar ao bolsista e devolver a matéria para que assim ele pudesse fazer a correção dos pontos marcados. Com a matéria pronta e aprovada, ela era encaminhada para o colega de bolsa responsável pelo gerenciamento do site, para que ele pudesse fazer a devida publicação. Ademais, o bolsista mantinha contato mensal com o orientador, por meio de reuniões virtuais ou de dúvidas tiradas diretamente pelas redes sociais.

Além da produção das matérias, para a realização do evento "Encontros do OVNE", o bolsista, junto ao colega de bolsa e ao orientador, era responsável por definir os convidados, o local e a data, além de realizar o contato direto com os profissionais para que então eles pudessem palestrar sobre seus devidos temas científicos, sobretudo da área aeroespacial. Todas as decisões eram tomadas com calma e bem planejadas pelos bolsistas e somente concretizadas após a aprovação pelo orientador.

Na realização das decisões, começava-se pela definição dos convidados, que em sua maioria eram profissionais recomendados pelo orientador. Após a decisão, os bolsistas faziam contato com os profissionais por meio das redes sociais, apresentando o projeto e convidando-os para a sua participação. Após os profissionais confirmarem suas presenças, iniciava-se a busca pelo melhor local e data para a realização do encontro. Dentre os parâmetros que se procuravam, o principal era saber se o local apresentava uma alta demanda de pessoas interessadas em participar do evento, em sua maioria jovens entusiastas que queriam ter um primeiro contato com a área do encontro. Somente com todos os outros pontos já decididos, fazia-se a decisão da sala e do horário exato que melhor atendesse às necessidades dos palestrantes e dos organizadores.

No momento da realização do evento, os bolsistas precisavam se certificar de que estava tudo certo antes do início e organizar o encerramento após o término. Durante o evento, eram responsáveis por introduzir os palestrantes e apresentar, de forma breve, o projeto OVNE e o motivo da realização do encontro. Qualquer tipo de homenagem, entrevista e apoio aos profissionais precisava ser organizado pelos bolsistas.

Resultados e Discussões

Quanto aos resultados produzidos ao longo do projeto, podia-se dividir em 3 vertentes, o gerenciamento do site pelo colega de bolsa, os encontros realizados durante todo o projeto e, por fim, o ponto mais abordado ao longo do projeto, sendo as matérias. Ao todo, foram 11 matérias diferentes, todas relacionadas a temas da ciência e tecnologia, em sua maioria temas da área aeroespacial, com uma média de 1 matéria por mês. Todas elas possuíam a mesma estrutura, com imagens e hyperlinks nas palavras-chave do texto.

Durante o período de criação de novas matérias, também era de grande importância continuar acompanhando as matérias antigas já publicadas, caso novas informações surgissem ao longo dos meses. Dependendo da circunstância, poderia haver somente a edição da matéria com as novas informações, ou então, caso houvesse dados suficientes, a criação de uma nova matéria dedicada exclusivamente aos novos acontecimentos. Entretanto, se não se enquadrasse em nenhuma das circunstâncias anteriores, havia ainda a possibilidade da criação de uma pequena postagem que levasse à matéria principal, com o objetivo apenas de adicionar uma pequena novidade.

Um exemplo de matéria em que foi necessário o acréscimo de novas informações foi “Primeiro Lançamento Comercial Realizado em Solo Brasileiro”, a qual informava sobre o lançamento do foguete sul-coreano HANBIT-Nano a partir de Alcântara, sendo o primeiro lançamento comercial a ser realizado em solo brasileiro. A matéria destacava

sua importância para o avanço do setor aeroespacial brasileiro e para a economia do país, descrevendo também a funcionalidade do foguete. Toda a matéria foi produzida com o intuito de alertar e conscientizar as pessoas sobre o lançamento e sua importância para o Brasil. Entretanto, durante o lançamento, o foguete acabou explodindo, e, devido ao grande volume de novas informações, fez-se necessária a criação de uma nova matéria para explicar todos os novos acontecimentos.

Pôde-se observar também a prioridade de notícias e acontecimentos mais locais ou da região em comparação a internacionais, enquanto notícias internacionais eram colocadas somente quando se tinha uma grande importância global, como é o exemplo da matéria “Artemis II: Primeiro Voo Tripulado à Lua em 53 Anos”. A matéria discorria sobre o projeto Artemis, dando foco à missão Artemis II, cujo objetivo era levar 4 tripulantes para sobrevoar nosso satélite natural e então retornar à Terra. Por ter sido considerada uma das missões aeroespaciais mais importantes desde a Apolo 17, foi de grande necessidade a criação de uma matéria dedicada a ela, e, é claro, de outras matérias sucessoras ao longo do que o projeto Artemis avançava.

Em contrapartida a notícias internacionais, pode-se citar uma notícia do Nordeste que foi postada com alta prioridade, sendo ela a matéria “Falha no Lançamento do Primeiro Satélite Desenvolvido no Maranhão”, que informava sobre um nanossatélite desenvolvido por estudantes e professores da UFMA, no Maranhão, chamado de Aldebaran-I, que acabou sendo destruído após uma falha no terceiro estágio do foguete.

Além das matérias, houve também os 'Encontros do OVNE'. Ao longo de todo o projeto de pesquisa, houve um único encontro, realizado no IFRN Campus Parnamirim. O encontro contou com a participação de dois importantes nomes da área aeroespacial, sendo eles Credson Isaac, professor do IFRN Campus Parnamirim e coordenador do projeto CVT-E, e Adriana Elysa Alimandro Correa, coordenadora da Unidade Regional do Rio Grande do Norte (URRN) da Agência Espacial Brasileira (AEB). O encontro também contou com uma homenagem ao ex-monitor do CVT-Espacial IFRN e medalhista da Olimpíada Brasileira de Satélites, Raianderson Germano, de apenas 23 anos. Houve a participação de diversos alunos do IFRN Campus Parnamirim, que tiravam dúvidas à medida que os profissionais palestravam.

Após a realização do encontro, houve a publicação de posts no Instagram oficial do projeto e de uma matéria chamada “Encontros com o OVNI "Pousa" no IFRN Parnamirim”, falando sobre como se deu o evento e seus objetivos dentro do projeto OVNE. Todos os resultados, como esta matéria e este encontro, assim como as demais publicações do site, desempenhavam um papel de divulgar e ensinar as pessoas, em sua grande maioria jovens, sobre a importância do avanço tecnológico brasileiro.

Nesse sentido, um dos objetivos primordiais do projeto sempre foi também o próprio bolsista, para que, além de incentivar novos jovens, o projeto pudesse também incentivar e introduzir o próprio bolsista a algum setor da ciência e tecnologia. Partindo da ideia de que uma mente jovem se familiariza de forma mais fácil e eficiente com notícias e publicações feitas por outros jovens, o projeto abriu vagas para estudantes do ensino médio.

Conclusão

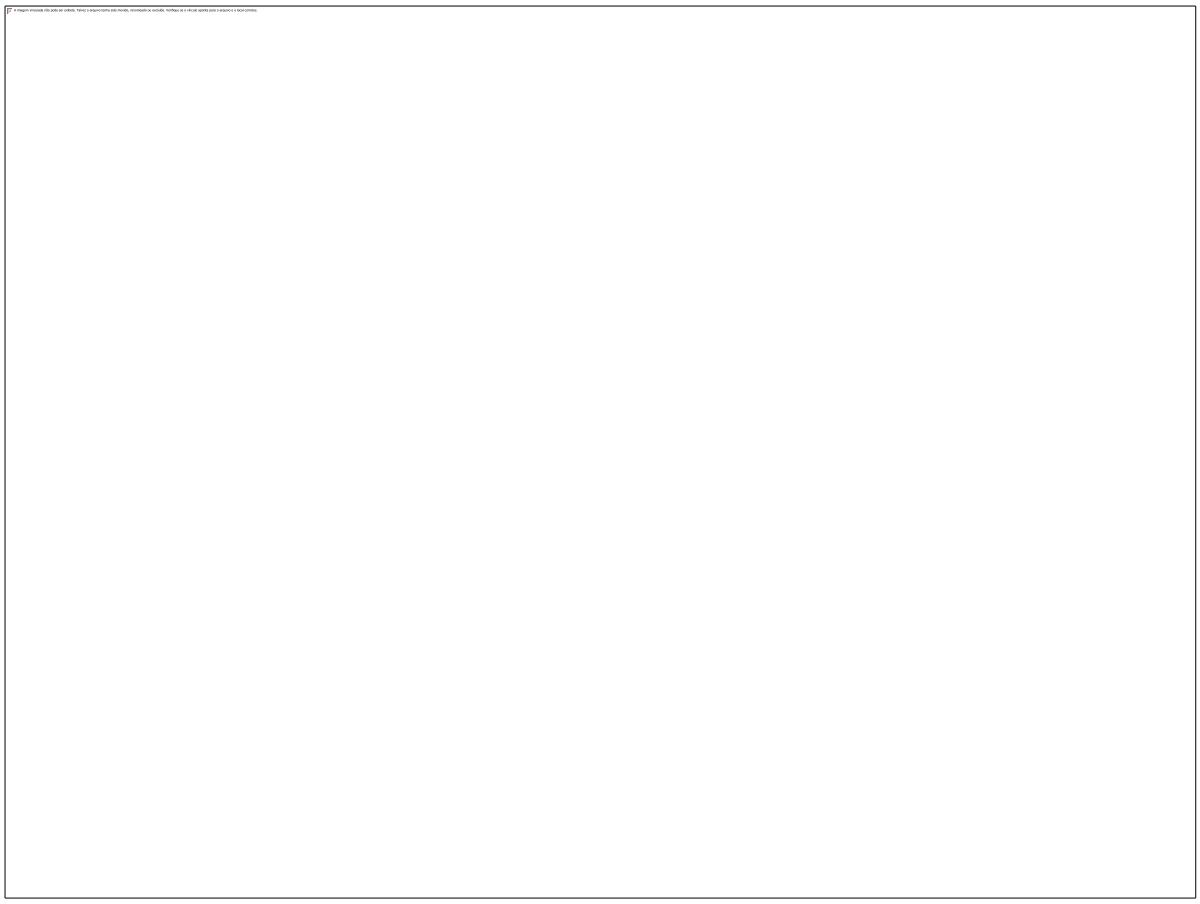
O projeto de pesquisa OVNE desempenhou um papel de aprendizado para os bolsistas responsáveis, de forma que, além de terem tido contato direto com setores acadêmicos, eles também foram capazes de compreender e vivenciar como um ambiente de trabalho acadêmico funciona. As reuniões mensais, os prazos de entrega das matérias e a grande demanda de elaboração e organização de matérias e encontros proporcionaram a experiência necessária para entender como um trabalho científico funciona. O projeto, então, cumpriu seu devido objetivo não somente para as pessoas de fora, mas também para os próprios bolsistas que realizaram todo o trabalho.

Nesse momento, os objetivos do projeto continuam os mesmos, porém ele está encaminhado para a realização de mais encontros e matérias, para que possa cumprir de forma mais eficiente seus objetivos, que são inspirar pessoas, em sua maioria jovens, a seguirem carreira em uma área científica ou tecnológica, e conscientizá-las sobre a importância do setor aeroespacial.

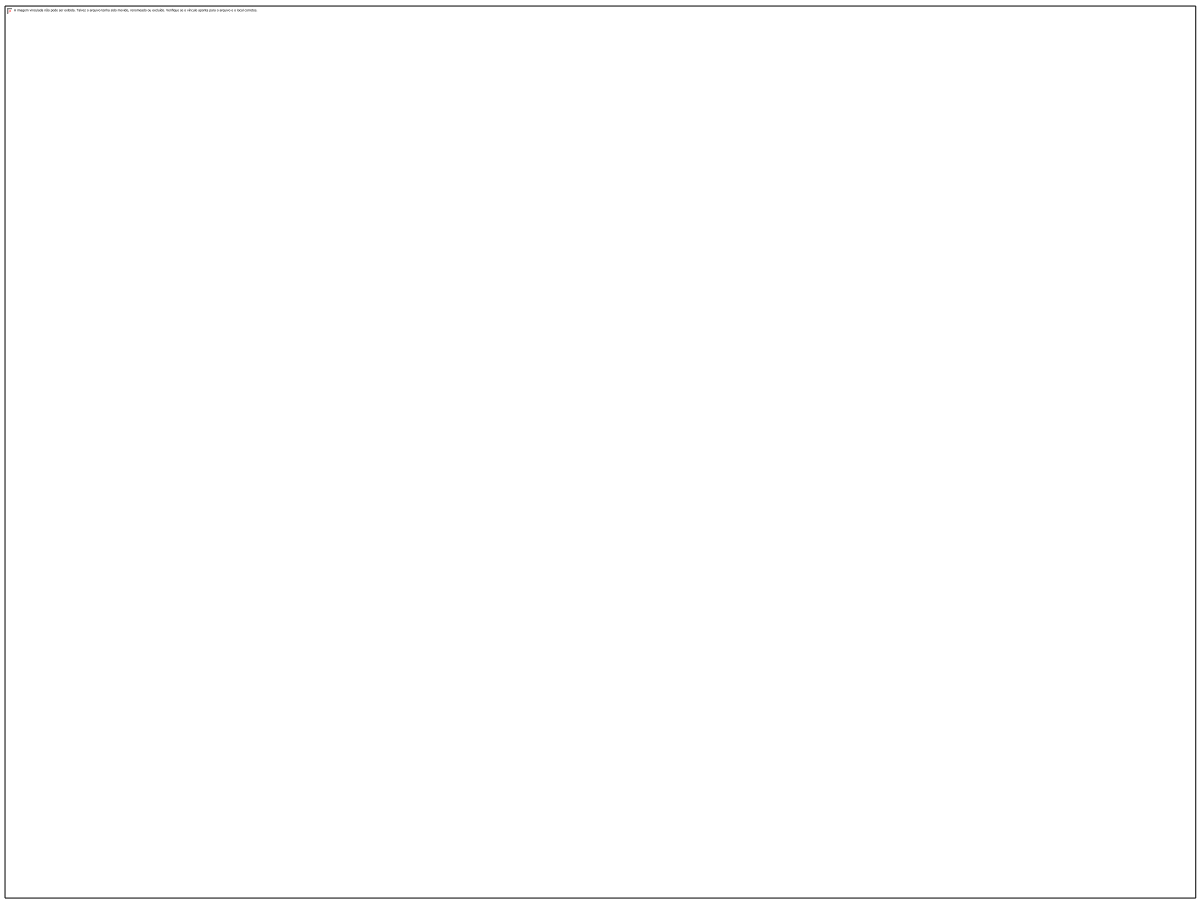
Referências

ALBAGLI, S. Divulgação Científica: informação científica para a cidadania? Ciência da Informação, Brasília, v. 25, n. 3, p. 396-404, set./dez. 1996.

Anexos



Realização do evento "Encontros do OVNE" IM1



Realização do evento "Encontros do OVNE" IM2

CÓDIGO: ET1035

AUTOR: GUILHERME ANDRADE VARELA

COAUTOR: MAXMILIANO VITOR DA SILVA CUNHA

COAUTOR: CRISLAINE BEATRIZ GUEDES DA SILVA

COAUTOR: GIOVANI POZZA AZONI

COAUTOR: GEORGE SANTOS MARINHO

COAUTOR: JOSE CESAR AUGUSTO DE QUEIROZ

ORIENTADOR: MAXWELL SANTANA LIBÓRIO

TÍTULO: Análise numérico-experimental da resistência mecânica de membrana para aplicações em tubo de choque

Resumo

O tubo de choque é um dispositivo experimental amplamente utilizado no estudo do escoamento de ar em regimes transônicos e supersônicos. Esse sistema é composto por duas seções, denominadas Driver (alta pressão) e Driven (baixa pressão), separadas por um par de membranas de alumínio responsáveis pela expansão do ar comprimido e pela geração da onda de choque. Atualmente, o rompimento das membranas de aproximadamente 0,1 mm de espessura ocorre sob pressão de aproximadamente 10 atm, gerando uma onda de choque necessária aos ensaios. No entanto, para investigar os efeitos dessa onda em materiais destinados a aplicações aeroespaciais, torna-se necessário operar em faixas de pressão mais elevadas, entre 10 e 20 bar. Nesse contexto, a análise será realizada pelo Método dos Elementos Finitos (FEM) no software ANSYS, considerando pressões entre 5 e 20 bar aplicadas ao driver. De forma análoga ao ensaio de expansão hidráulica (hydraulic bulge test), o deslocamento central da membrana é adotado para estabelecer a relação pressão–deformação e avaliar a aproximação às condições de ruptura. Os resultados fornecem conclusões importantes para estudos posteriores com diferentes espessuras e riscos radiais, contribuindo para o controle da ruptura e para a operação segura do equipamento.

Palavras-chave: FEM, tubo de choque, resistência dos materiais, onda de choque

TITLE: Numerical-experimental analysis of the mechanical resistance of a membrane for shock tube applications

Abstract

The shock tube is an experimental device widely used to study airflow under transonic and supersonic regimes. This system consists of two sections, referred to as the driver (high pressure) and the driven (low pressure), separated by a pair of aluminum diaphragms that expand the compressed air and generate the shock wave. Currently, diaphragms approximately 0.1 mm thick rupture at about 10 atm, generating the shock wave required for the tests. However, investigating the effects of this wave on materials intended for aerospace applications requires operation at higher pressure levels, ranging from 10 to 20 bar. In this context, the analysis will be performed using the Finite Element Method (FEM) in ANSYS software, considering pressures ranging from 5 to 20 bar applied to the driver. As in the hydraulic bulge test, the central displacement of the diaphragm is used to establish the pressure–deformation relationship and assess the approach to rupture conditions. The results provide important insights for subsequent studies involving different diaphragm thicknesses and radial grooves, contributing to rupture control and safe equipment operation.

Keywords: FEM, shock tube, material resistance, shock wave

Introdução

A partir de 2019, com o estabelecimento da parceria entre a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e o Instituto de Estudos Avançados (IEAv), organização militar vinculada ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) da Força Aérea Brasileira (FAB), o Departamento de Engenharia Mecânica recebeu, tubos de aço destinados à construção do primeiro tubo de choque acadêmico da instituição. A incorporação desse equipamento à infraestrutura universitária amplia as possibilidades de realização de atividades experimentais nas áreas da engenharia mecânica, aeroespacial e materiais. Além disso, de forma específica, favorece o desenvolvimento de pesquisas em aerotermodinâmica, escoamentos compressíveis e regimes supersônicos e hipersônicos (Fiuza; Paula Toro; Marinho, 2021).

O tubo de choque é um dispositivo experimental destinado à geração e à propagação controladas de ondas de choque, permitindo reproduzir, em escala laboratorial, condições transitórias de elevada pressão, temperatura e velocidade. Por esta razão, é amplamente empregado na investigação de escoamentos compressíveis, na caracterização de gases em condições extremas, na calibração de sensores de pressão e na avaliação da resposta de materiais e estruturas submetidos a carregamentos impulsivos (Downes; Knott; Robinson, 2014; Park et al., 2023; Rahman et al., 2024). A configuração convencional do equipamento consiste em uma seção motora (driver), contendo gás a alta pressão, e uma seção movida (driven), mantida inicialmente em pressão inferior, separadas por um diafragma ou membrana de ruptura. Quando a diferença de pressão atinge o limite de resistência da membrana, ocorre sua ruptura súbita, dando origem a uma onda de choque que se propaga pela seção de baixa pressão, enquanto uma onda de expansão se desloca em sentido contrário na seção de alta

pressão (Kumar; Nedungadi, 2020). A razão inicial entre as pressões, as propriedades dos gases, a geometria do tubo e o tempo e o padrão da abertura da membrana influenciam diretamente a formação, a intensidade, a velocidade e atenuação da onda de choque, sendo, portanto, parâmetros fundamentais para a repetibilidade e a confiabilidade dos ensaios (Amer et al., 2021; Janardhanraj; Abhishek; Jagadeesh, 2021).

Entretanto, a operação segura e reprodutível do tubo de choque depende do conhecimento prévio do comportamento mecânico da membrana durante a pressurização do driver, uma vez que sua ruptura determina o início do escoamento e influencia diretamente a formação e as características da onda de choque. A definição inadequada da espessura, dos riscos radiais e/ou da geometria da membrana pode resultar em ruptura prematura, pressão superior à prevista ou abertura irregular, comprometendo a segurança operacional e a confiabilidade dos ensaios (Liu et al., 2024; Subburaj; Figueroa-Labastida; Farooq, 2025). A deformação produzida pela pressão apresenta comportamento semelhante ao observado no ensaio de expansão hidráulica (hydraulic bulge test), no qual a pressão aplicada se relaciona ao deslocamento central, parâmetro importante para a avaliação da resposta mecânica de chapas finas submetidas a um estado biaxial de tensões (Cusanno et al., 2021). Assim, este trabalho tem como objetivo estabelecer, por meio de modelagem numérica com o Método dos Elementos Finitos (FEM), no software ANSYS, a relação entre a pressão no driver, na faixa de 5 a 20 bar, e a deformação central de membranas constituídas pela liga de alumínio 3104-H16, visando estimar as condições de ruptura. Os resultados constituem uma base para o dimensionamento de membranas com diferentes espessuras e configurações de riscos radiais, contribuindo para o controle da pressão e do modo de abertura, para a operação segura do equipamento e para a realização de ensaios sob diferentes pressões e velocidades de propagação da onda de choque.

Metodologia

As propriedades mecânicas da liga de alumínio AA3104-H16 foram definidas com base em dados disponíveis na literatura e inseridas no ANSYS para representar o comportamento elástico do material. Adotou-se um modelo de elasticidade linear isotrópica, com módulo de Young E = 70 GPa e coeficiente de Poisson v = 0,33 (Neto et al., 2022). Modelos geométricos de membranas com diferentes espessuras foram construídos para avaliar a influência dessa espessura sobre a deformação induzida pela pressão aplicada. A geometria da membrana apresentada no Anexo 1.1 corresponde a uma folha de alumínio de 60 x 60 mm e espessura de 0,1 mm. A região periférica da geometria foi fixada para restringir o movimento do modelo e favorecer a convergência numérica. Por outro lado, delimitou-se uma região circular com diâmetro de 50,8 nm, correspondente ao diâmetro interno do tubo de choque, a ser submetida à pressão distribuída. As vistas frontal e posterior são apresentadas no Anexo 1.3. Essa geometria foi usada como modelo-base para as diferentes condições de pressão analisadas.

Os modelos foram discretizados por meio de malhas (mesh) de elementos finitos. Os parâmetros empregados na geração e no refinamento das malhas são apresentados nos Anexos 1.1 e 1.2. O procedimento de discretização buscou reduzir o tamanho dos

elementos na região circular efetivamente submetida à pressão, na qual se esperavam os maiores deslocamentos e gradientes de deformação. Também foram adotados critérios de controle da malha para melhorar a distribuição e a qualidade dos elementos, contribuindo para a estabilidade e a convergência da solução numérica. As malhas resultantes, com a distribuição dos nós e elementos ao longo da geometria da membrana, são apresentadas nos Anexos 1.4 e 1.5.

As simulações foram realizadas no módulo Static Structural do ANSYS, destinado à análise estrutural de corpos deformáveis pelo método dos elementos finitos (FEM). Foram aplicadas pressões de 5 a 20 bar sobre a região circular de 50,8 mm de diâmetro, com o objetivo de avaliar a resposta mecânica da membrana em função do aumento da pressão. Foram definidos o número de passos de carga e os respectivos incrementos, além de serem considerados uma grande deformação e a não linearidade geométrica (Large Deflection). As condições de contorno compreenderam a aplicação de pressão uniformemente distribuída nas regiões delimitadas das faces da membrana e a restrição de sua região periférica, conforme apresentado nos Anexos 1.6 e 1.7. No pós-processamento, foram selecionados os resultados de deslocamento total e de deslocamento direcional ao longo do eixo do plano inicial da membrana, conforme mostrado no Anexo 1.8.

O mesmo procedimento de modelagem, geração da malha, aplicação das condições de contorno e solução numérica foi repetido para as membranas com espessuras de 0,1; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 mm. Com base nos resultados obtidos, foram estabelecidas as relações entre a pressão aplicada e o deslocamento central da membrana para cada espessura analisada. Os valores resultantes são apresentados na tabela do Anexo 1.9.

Resultados e Discussões

Para cada espessura obtivemos a seguinte relação presente na tabela abaixo(anexo 2):

Tabela 1 – Deformação da membrana, segundo a pressão aplicada, por espessura da membrana

ANEXO 2

A simulação demonstrou uma significativa redução da deformação da membrana com o aumento de sua espessura, comportamento facilmente observado ao comparar as espessuras de 0,1 mm e 2,0 mm. Esse resultado evidencia a influência da espessura sobre a rigidez da membrana e, consequentemente, sobre sua capacidade de resistir à deformação quando submetida à pressão.

As propriedades mecânicas utilizadas para o material metálico consideram seu comportamento dentro do regime elástico. Dessa forma, os resultados obtidos para a membrana de 0,1 mm, especialmente nas pressões de 15 e 20 bar, devem ser interpretados com cautela, uma vez que as deformações observadas podem indicar uma extrapolação das condições de validade do modelo computacional e, portanto, não

necessariamente representar o comportamento real do material. A partir da espessura de 0,5 mm, observa-se um comportamento mais estável entre os diferentes níveis de pressão, tornando os resultados mais consistentes para a análise comparativa da influência da pressão e da espessura sobre a deformação da membrana.

Conclusão

As simulações foram capazes de alcançar resultados satisfatórios ao alcançarem uma relação Pressão x Deformação que se altera para cada espessura selecionada e demonstra o impacto dessa variável na resistência oferecida pelas membranas. Os valores serão implementados como referência para um futuro ensaio no tubo de choque a fim de comparar os valores obtidos pelo software com o caso real a fim de comparar os dados obtidos em ambos os casos.
Para futuras simulações, maior refinamento nas faces escolhidas para receber os parâmetros de pressão, como redução de defeitos, mudança de método da malha e parâmetros avançados serão implementadas e testadas para reduzir a margem de erro e garantir maior fidelidade entre software e ensaios, necessário para desenvolvimento de pesquisas que utilizem o equipamento.

Referências

AMER, Eynas et al. Evaluation of Shock Tube Retrofitted with Fast-Opening Valve for Dynamic Pressure Calibration. Sensors, v. 21, n. 13, p. 4470, jan. 2021.

DOWNES, Stephen; KNOTT, Andy; ROBINSON, Ian. Towards a shock tube method for the dynamic calibration of pressure sensors. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, v. 372, n. 2023, p. 20130299, 28 ago. 2014.

FIUZA, William Henrique de Lima; PAULA TORO, Paulo Gilberto; MARINHO, George Santos. Análise computacional da estrutura de um tubo de choque acadêmico simplificado. Análise computacional da estrutura de um tubo de choque acadêmico simplificado, 2021.

JANARDHANRAJ, S.; ABHISHEK, K.; JAGADEESH, G. Insights into the shockwave attenuation in miniature shock tubes. Journal of Fluid Mechanics, v. 910, p. A3, mar. 2021.

KUMAR, Rubbel; NEDUNGADI, Ashish. Using Gas-Driven Shock Tubes to Produce Blast Wave Signatures. Frontiers in Neurology, v. 11, 21 fev. 2020.

LIU, Yang (刘阳) et al. General theory of diaphragm rupture in a shock tunnel. Physics of Fluids, v. 36, n. 11, p. 117149, 12 nov. 2024.

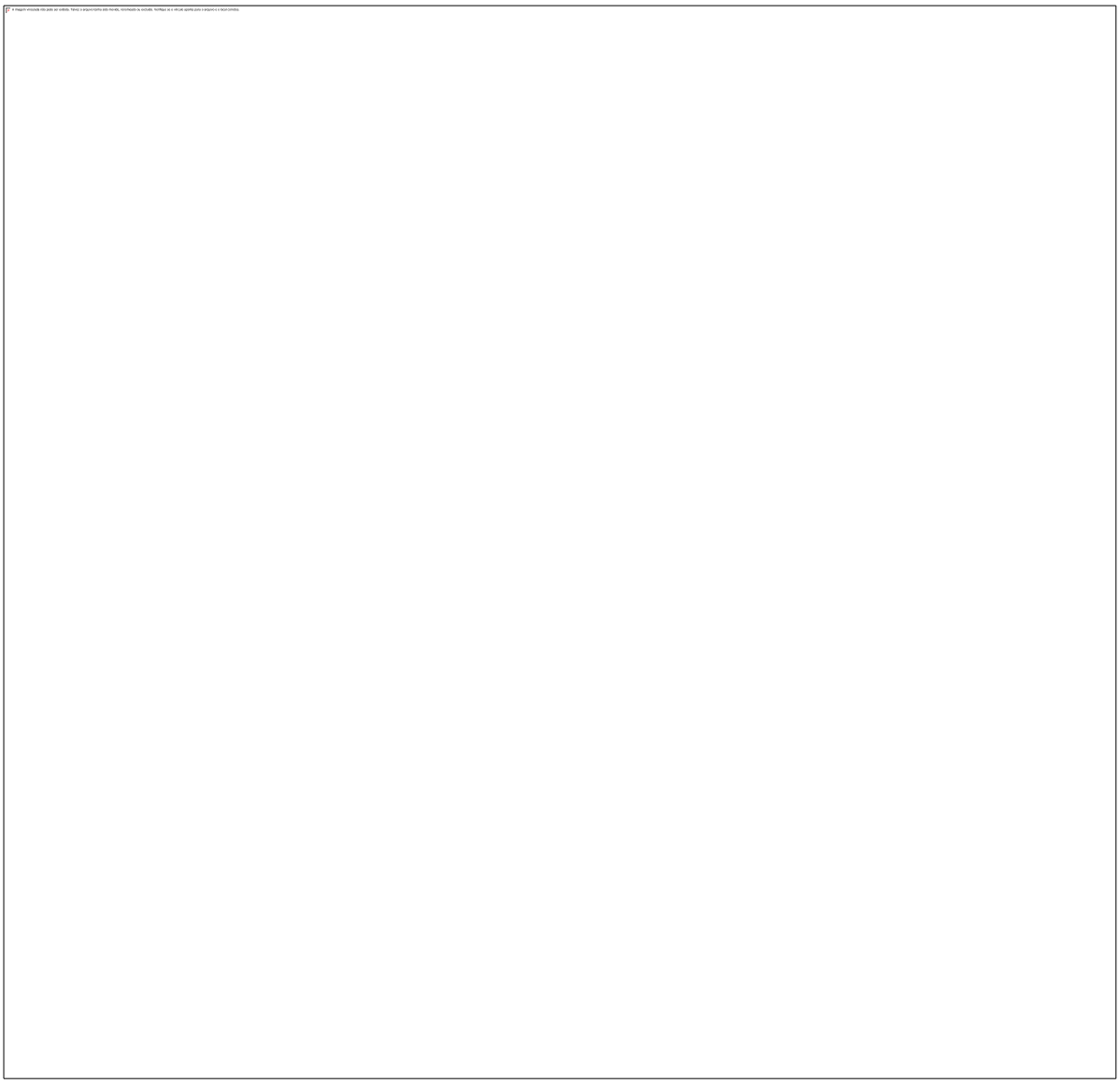
NETO, Diogo M. et al. Non-Uniform Effect of the Contact Conditions on the Earing Profile in Cylindrical Cups of Anisotropic Materials. Key Engineering Materials, v. 926, p. 1188–1194, 2022.

PARK, Gang-Kyu et al. Blast Resistance Capacities of Structural Panels Subjected to Shock-Tube Testing with ANFO Explosive. Materials, v. 16, n. 15, p. 5274, jan. 2023.

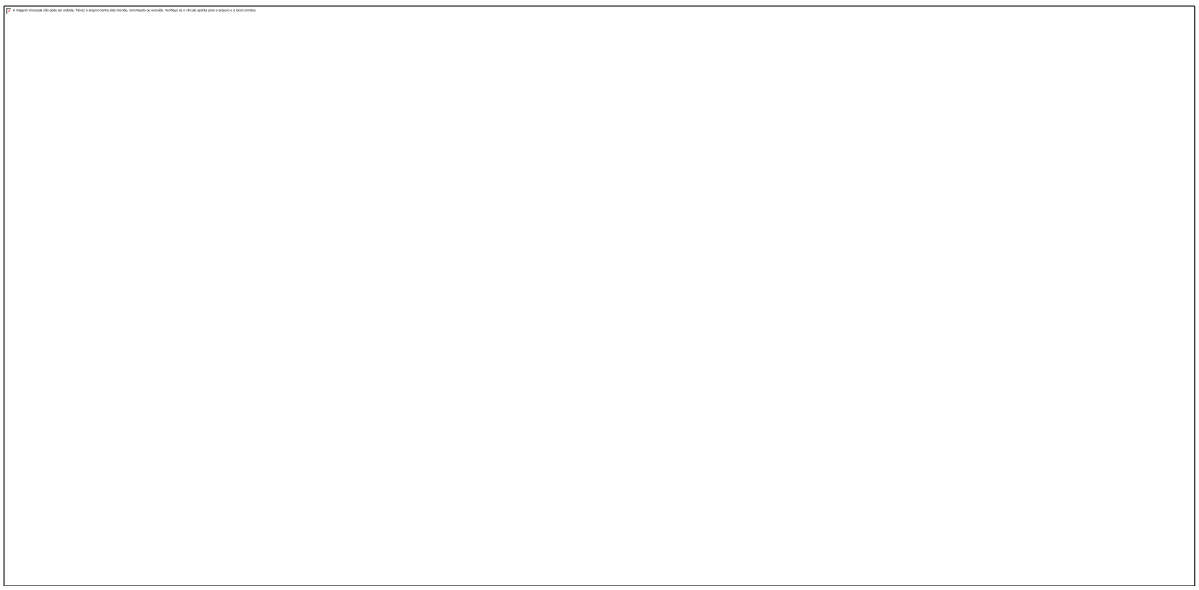
RAHMAN, Mohammad Sazedur et al. Development of a novel method to characterize shock waves interaction with solid objects. Scientific Reports, v. 14, n. 1, p. 28956, 22 nov. 2024.

SUBBURAJ, Janardhanraj; FIGUEROA-LABASTIDA, Miguel; FAROOQ, Aamir. Predicting non-ideal effects from the diaphragm opening process in shock tubes. Physics of Fluids, v. 37, n. 1, p. 016129, 14 jan. 2025.

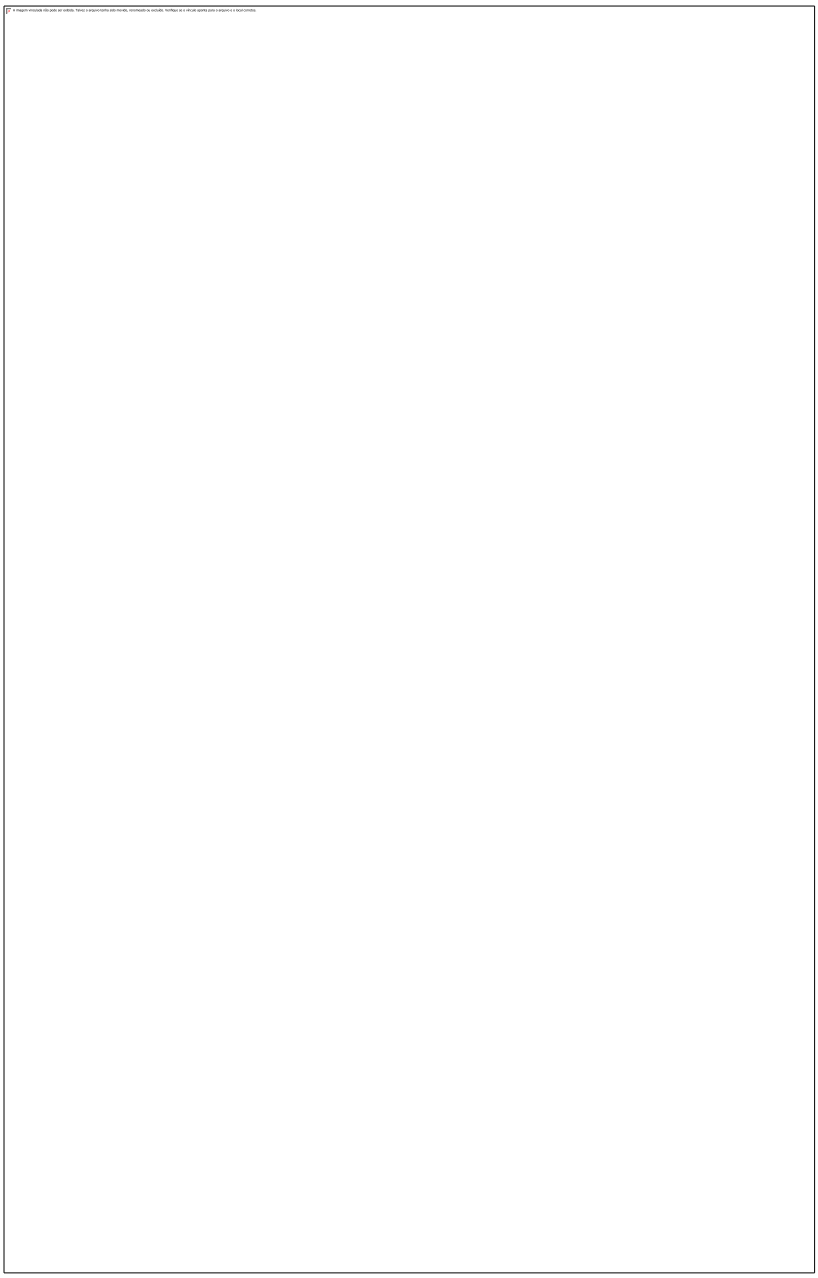
Anexos



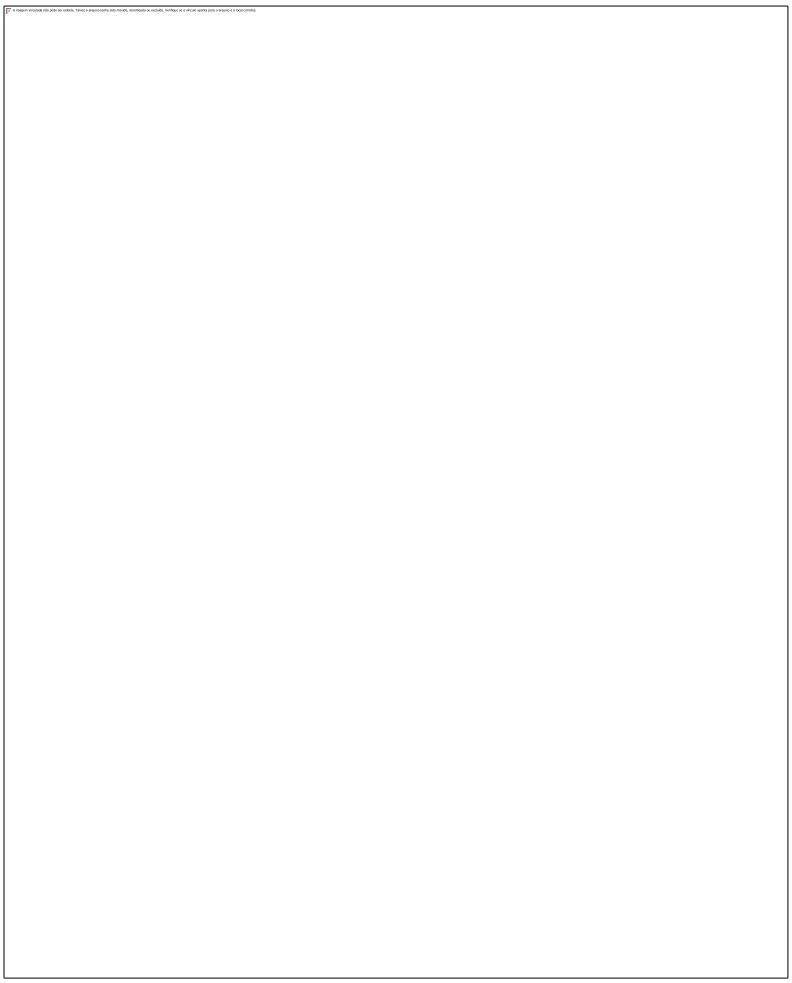
Anexo 1.1 - Vista Frontal da Geometria



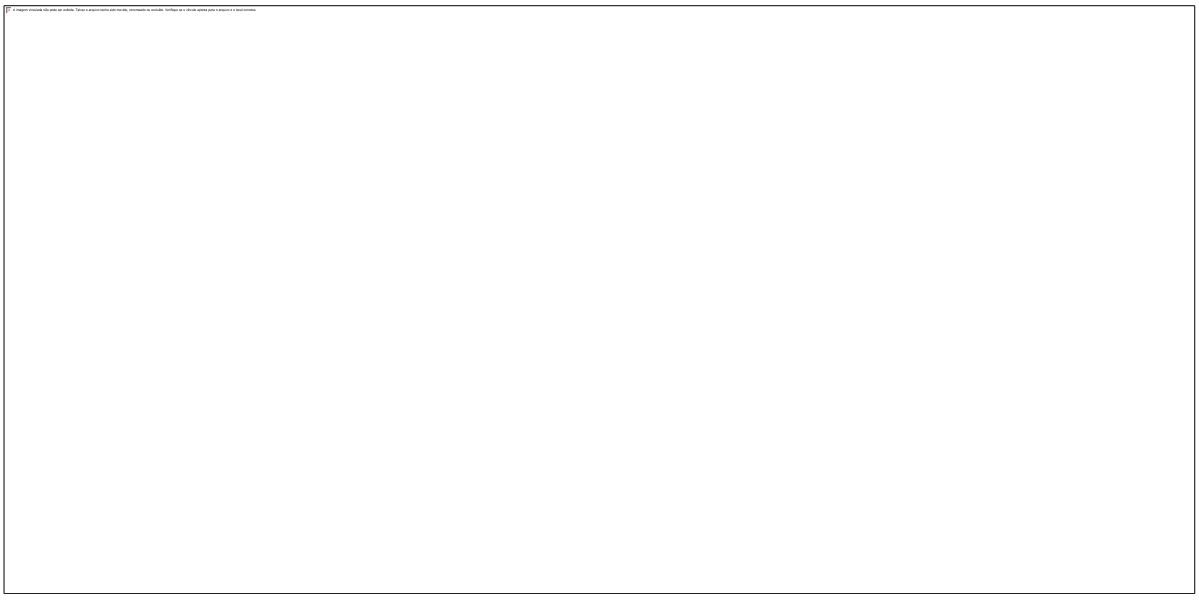
Anexo 1.3 - Vista Isométrica na membrana de 2mm



Anexo 1.4 - Detalhes gerais da malha



Anexo 1.5 - Opções de refinamento da malha e Workflow do ansys



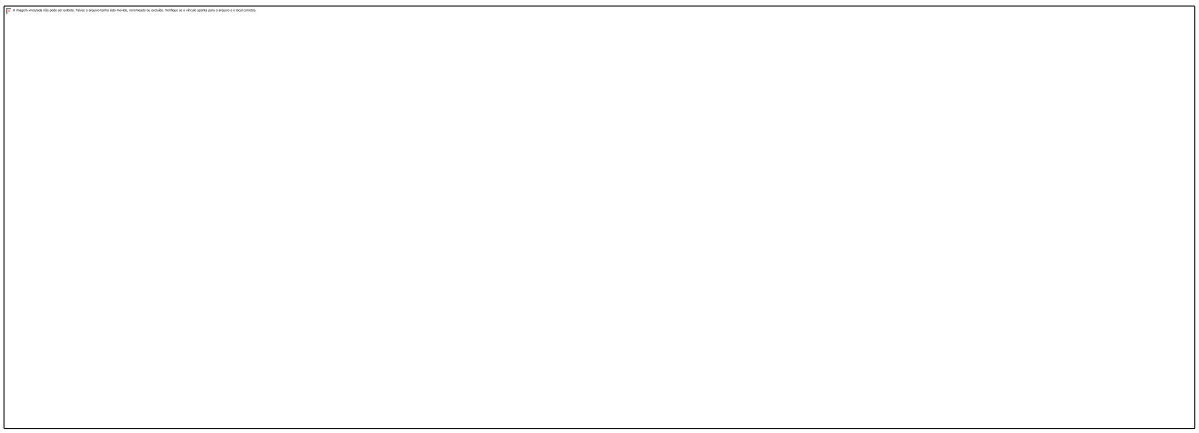
Anexo 1.6 - Seleção de suporte em uma das faces



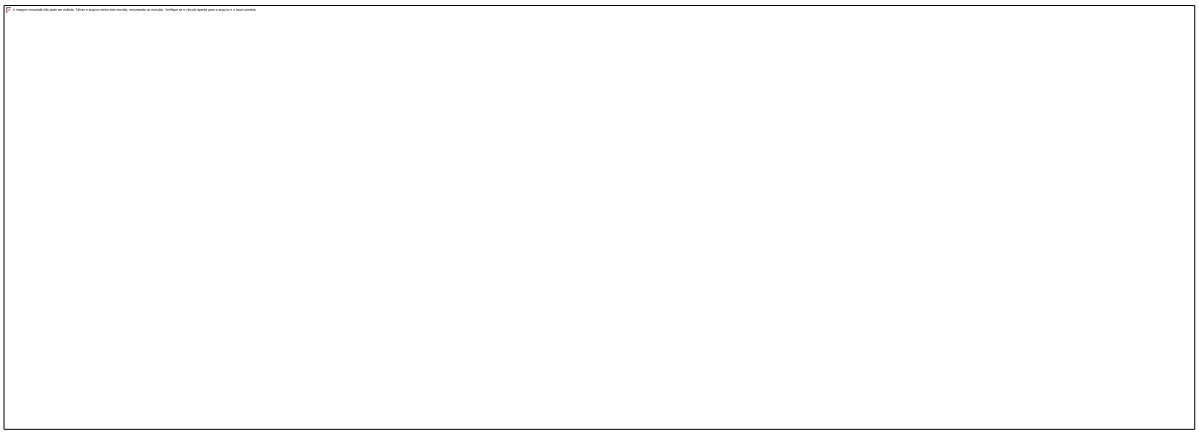
Anexo 1.7 - pressão aplicada em uma das faces



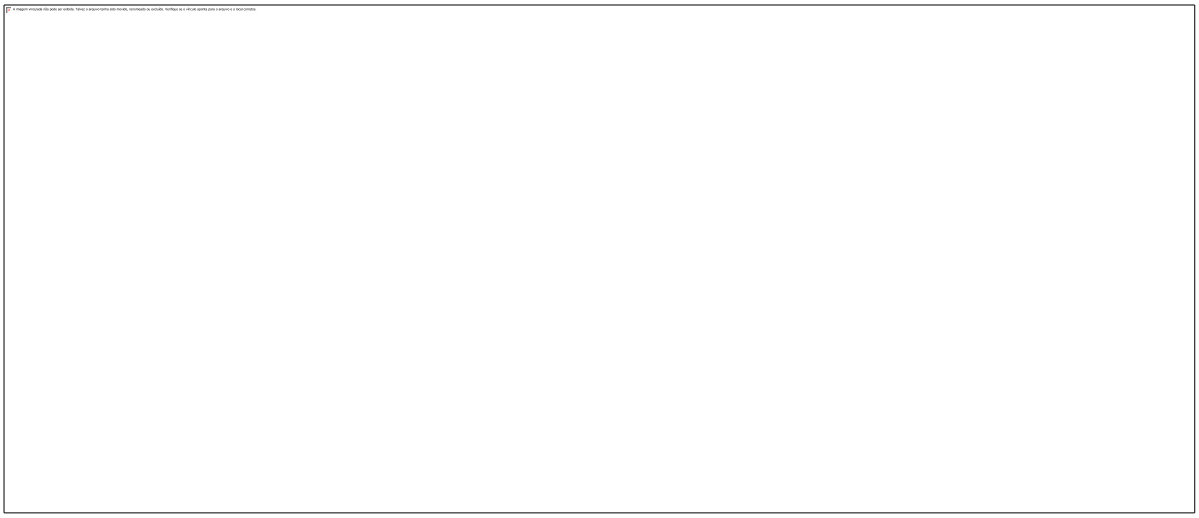
Anexo 1.7 - pressão aplicada em outra face



Anexo 1.8 - Deformação total em exemplo membrana 2mm



Anexo 1.8- Deformação direcional exemplo 2mm



Anexo 2 - Tabela relacionando Pressão, Deformação e Espessura da membrana

CÓDIGO: ET1054

AUTOR: PEDRO THIAGO ELOI DE LIMA

COAUTOR: IDALMIS MILIAN SARDINA MARTINS

ORIENTADOR: SERGIO QUEIROZ DE MEDEIROS

TÍTULO: Análise do consumo energético de aplicações HPC em arquiteturas de memória compartilhada

Resumo

Os centros de pesquisa (acadêmicos, militares, entre outros) fazem uso de supercomputadores que, por sua natureza, consomem uma grande quantidade de energia elétrica. Nesses ambientes de computação de alto desempenho (HPC), a busca por técnicas ou ferramentas que possibilitem o aumento da eficiência energética sem comprometer o desempenho se tornou um aspecto essencial. Dentro desse cenário, este trabalho apresenta uma perspectiva do consumo energético de aplicações paralelas de alto desempenho utilizando os kernels do benchmark NPB-CPP. Foram realizados experimentos de medição energética em máquinas diferentes (Intel e AMD) por meio da interface RAPL, utilizando as principais cargas de trabalho para todos os kernels disponíveis. Os resultados mostraram que, para a maioria dos benchmarks avaliados, utilizar mais threads faz com que o programa encerre rápido o suficiente para que seu consumo total seja reduzido, aumentando a eficiência energética. Por outro lado, o benchmark MG apresentou um consumo energético maior, embora tenha obtido um tempo de execução menor, em comparação com a implementação sequencial.

Palavras-chave: eficiência energética, RAPL, HPC

TITLE: Energy consumption analysis on HPC applications in shared-memory arquitectures

Abstract

Research centers (academic, military, and others) use supercomputers that, by their nature, consume a substantial amount of electric energy. In these environments of high-performance computing (HPC), the search for techniques or tools that allow for an increase in energy efficiency without compromising performance has become an

essential aspect. In this scenario, this work presents a perspective on the energy consumption of high performance parallel applications using the kernels from the NPB-CPP benchmark. Energy consumption experiments were conducted on different machines (Intel and AMD) via the RAPL interface, utilizing the main workloads for all available kernels. Results showed that, for most evaluated benchmarks, using more threads allows the application to finish quickly enough to reduce its total consumption, increasing energy efficiency. On the other hand, the MG benchmark exhibited higher energy consumption, although it achieved a lower execution time compared to the sequential implementation.

Keywords: energy efficiency, RAPL, HPC

Introdução

O aumento do consumo de energia elétrica do setor de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) é evidente nos últimos anos. O setor de TIC foi responsável por 7% do consumo de energia elétrica do planeta e também foi responsável por 2% das emissões de CO2 na atmosfera, o mesmo percentual de CO2 emitido pelo setor de aviação
civil [Greenpeace 2017, Comissão Europeia 2025].
No contexto dos supercomputadores e da computação de alto desempenho, há uma grande demanda de recursos energéticos para processar aplicações científicas complexas. Nesse cenário, é muito comum fazer uso do paradigma da computação paralela e empregar o uso de threads para utilizar os núcleos ociosos da máquina a fim de reduzir o
tempo de execução total das tarefas. Sob o ponto de vista energético, diminuir o tempo de execução geralmente compensa o aumento da potência da aplicação, mas isso não se aplica de maneira uniforme às aplicações paralelas devido ao custo adicional no tempo de
comunicação entre as threads e/ou sincronização entre elas.
Para avaliar o consumo energético de aplicações HPC, foram utilizados os kernels do NPB-CPP [Löff et al. 2021], uma implementação na linguagem C++ do NAS Parallel benchmarks (NPB). As suas principais implementações de paralelismo utilizam os frameworks: FastFlow, OpenMP, e OneTBB (previamente conhecido como Intel
TBB). Existem diferentes cargas de trabalho para cada aplicação, e elas são representadas por classes. As classes B e C, que foram utilizadas neste trabalho serão detalhadas na
Seção 3. As principais contribuições deste trabalho são o mapeamento inicial do consumo
energético das principais classes (B e C) das aplicações do NPB-CPP e a análise inicial do impacto da variação do número de threads no consumo energético desses benchmarks
em processadores Intel e AMD.

Metodologia

Para realização dos experimentos, foram utilizados dois ambientes computacionais que estão descritos na Tabela 1. Para que o consumo energético de programas em segundo plano do computador
tivessem a menor influência possível nos resultados, cada experimento foi realizado após
reiniciar o computador e no modo texto do Linux. Como ferramenta para medição do consumo energético, utilizou-se o perf e os valores foram obtidos por meio de uma média
simples de 30 execuções, conforme [Cruz 2021], para cada benchmark. Cada execução mediu o consumo energético do programa em joules, o tempo de CPU (tempo de sistema + tempo de usuário) em nanossegundos, e o tempo de execução em nanossegundos de cada uma das implementações de paralelismo dos benchmarks (FastFlow, OpenMP e OneTBB). A quantidade de threads utilizadas nos experimentos vai até 4 porque é a quantidade máxima presente no processador Intel. Os benchmarks utilizados constituem o NPB-CPP, que é composto por 5 aplicações, sendo elas:

• Gradiente conjugado (CG). Calcula uma aproximação do menor autovalor de uma matriz grande, esparsa e não estruturada, utilizando o método dos Gradientes Conjugados. Este kernel estressa os mecanismos de comunicação de dados, bem como a localidade de memória e as memórias cache.

• Embaraçosamente paralelo (EP). Ele gera uma grande quantidade de variáveis aleatórias gaussianas e as enumera para computar o desvio gaussiano utilizando o método de aceitação e rejeição. Por fim, calcula-se a quantidade de pares situados no anel quadrado (square annulus). Esse método é útil para mensurar a capacidade de operações de ponto flutuante da arquitetura-alvo.

• Transformada rápida de Fourier discreta 3D (FT). Calcula a Transformada Rápida de Fourier (FFT) de uma equação diferencial parcial 3D usando os métodos espectrais e inversos em um loop iterativo. Simula uma comunicação de longa distância intensiva.

• Ordenação de inteiros (IS). Realiza uma ordenação de inteiros em um conjunto esparso de números. Por padrão, é baseado no algoritmo Bucket-Sort. Este kernel simula e mede as capacidades de computação de inteiros e de comunicação de dados.

• Método multi grid (MG). Utiliza o método V-cycle MultiGrid para resolver uma equação de Poisson escalar 3D, em que o kernel calcula continuamente a restrição e o prolongamento ao alternar entre grades grossas e finas. O objetivo é estressar as comunicações de dados de curta e longa distância.

Os diferentes tamanhos das cargas de trabalho dos benchmarks são representados por classes. Nesse sentido, as classes A, B e C são o tamanho padrão para os problemas de teste de referência. O tamanho da carga de trabalho aumenta em aproximadamente 4x de uma classe para a outra, ou seja: a classe A representa a menor carga de trabalho enquanto as classes B e C representam uma carga de trabalho 4 vezes, e 16 vezes maior que a classe A, aproximadamente, respectivamente. Neste trabalho serão apresentados os
resultados obtidos para a classe C, pois foram mais significativos.

Resultados e Discussões

Nesta seção, serão apresentados os principais resultados dos experimentos de medição do
consumo energético. O objetivo desse experimento foi avaliar o consumo energético das classes B e C dos benchmarks de acordo com a implementação de paralelismo específica
(FastFlow, OpenMP e OneTBB) variando a quantidade de threads entre 1, 2 e 4 threads. Embora o NPB-CPP apresente 5 kernels (CG, EP, FT, IS, MG), a análise irá focar na apresentação detalhada dos resultados obtidos para a classe C dos benchmarks EP e MG.

Essa escolha justifica-se por razões de concisão e representatividade, pois o benchmark EP reflete a tendência geral observada ao longo do estudo, enquanto a aplicação MG apresenta um comportamento divergente dessa tendência. Após análise dos resultados, surgiu a tendência de que a classe B tenha o mesmo comportamento que a classe C, portanto, a escolha da classe C é arbitrária. As Figuras 1 e 2 apresentam o consumo energético e o tempo de execução das principais implementações de paralelismo para a classe C do benchmark EP em função da quantidade de threads nos dois ambientes computacionais: Intel e AMD, respectivamente.

De acordo com o gráfico presente na Figura 1, observa-se que há uma queda brusca no consumo energético conforme a quantidade de threads aumenta. O mesmo fenômeno é observado no tempo de execução. Não há uma diferença significativa entre o consumo energético e o tempo de execução da aplicação, independente da implementação de para-
lelismo utilizada.

Na Figura 2, o comportamento do consumo energético e do tempo de execução é análogo à máquina Intel. Entretanto, no que diz respeito às implementações especificamente, é notável que a implementação FastFlow apresenta um consumo energético maior
que as implementações OpenMP e OneTBB e isso se repete para o tempo de execução, mesmo que essa diferença seja atenuada tanto para o consumo energético quanto para o tempo de execução, conforme a quantidade de threads aumenta.

A seguir, as Figuras 3 e 4 apresentam o consumo energético e o tempo de execução do benchmark MG em função da quantidade de threads, na máquina Intel e na máquina AMD, respectivamente.

De acordo com o resultado apresentado no gráfico da Figura 3, observa-se
um aumento no consumo energético do benchmark MG conforme a quantidade de threads aumenta, em todas as implementações de paralelismo. Nesse cenário, a implementação FastFlow se destaca por apresentar o maior consumo energético dentre todas as implementações. A mesma também se destaca por ter um tempo de execução maior que os frameworks OpenMP e OneTBB em todas as quantidades de threads utiliza-
das nos experimentos.

É possível constatar, com base no gráfico da Figura 4, que o consumo energético do benchmark MG apresenta uma redução quando a quantidade de threads aumenta de 1 para 2 em todas as implementações, porém essa redução é mínima para a implementação
FastFlow. Conforme a quantidade de threads da aplicação aumenta de 2 para 4, nota-se

um aumento no consumo energético em todas as implementações avaliadas, mas novamente a implementação FastFlow se destaca, apresentando o maior consumo energético dentre todas elas. Do ponto de vista do tempo de execução há sempre uma redução. Entretanto, a transição de 2 para 4 threads proporciona um ganho no desempenho temporal proporcionalmente menor do que foi observado de 1 para 2 threads, indicando a possibilidade de que haja uma comunicação excessiva entre as threads ou a presença de sobrecarga nas barreiras de sincronização.

A respeito das diferentes implementações de paralelismo analisadas neste trabalho, os resultados indicam que, no ambiente Intel, não há uma diferença significativa entre o consumo energético de cada framework, conforme observado na Figura 1, cujo consumo energético é praticamente o mesmo para o benchmark EP e a tendência se mantém para a maioria dos benchmarks. As excecuções são o CG (ao utilizar 2 threads) e MG (em todas as contagens de threads), nos quais o framework FastFlow apresenta um maior consumo energético, em comparação com OpenMP e OneTBB. Já no ambiente AMD, o framework FastFlow apresenta um consumo energético consistentemente superior para os benchmarks EP e MG, quando comparado com os frameworks OpenMP e OneTBB. No restante dos benchmarks a diferença não é expressiva o suficiente para que um framework tenha preferência, ao considerar exclusivamente a ótica da eficiência energética.

A comparação entre os resultados obtidos evidencia dois cenários distintos quanto ao tempo de execução e à eficiência energética. Enquanto a maioria dos benchmarks se beneficia do aumento da quantidade de threads do ponto de vista do seu tempo de execução e do seu consumo energético, o kernel MG apresenta um aumento significativo em seu consumo energético. O aumento da quantidade de threads que a aplicação utiliza promove uma maior eficiência energética para a maioria dos benchmarks avaliados (EP, CG, FT e IS), englobando perfis de aplicações paralelas com ênfase em operaçõe de ponto flutuante (EP), multiplicação de matrizes esparsas e acessos indiretos à memória (CG), padrões de comunicação intensiva (FT) e aritmética de inteiros (IS). Nesses cenários, a redução no tempo de execução compensa o aumento da potência demandada pelo processador e permite que o sistema conclua o processamento e retorne mais rapidamente ao estado de ociosidade (idle), no qual consome menos energia.

Por outro lado, o kernel MG alinha-se com o que foi observado pelos autores em [Ostapenco et al. 2025], os quais caracterizam essa aplicação como intensiva no subsistema de memória (DRAM) e com um perfil de potência instável. A combinação de acessos recorrentes à memória, comunicação de curta e longa distância e frequentes barreiras de sincronização entre as threads faz com que o aumento de threads seja prejudicial do ponto de vista da eficiência energética. Além disso, esse benchmark obteve um consumo energético superior à implementação sequencial, embora tenha demonstrado um menor tempo de execução.

Por fim, com base nos resultados apresentados e na discussão realizada, conclui-se que o aumento da quantidade de threads de uma aplicação paralela pode levar a um aumento em sua eficiência energética, embora o grau de benefício seja heterogêneo entre as aplicações e dependa do perfil de cada aplicação.

Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise inicial do consumo energético das aplicações HPC contidas no NPB-CPP, que é uma implementação do NPB para a linguagem C++. Os experimentos foram realizados em dois ambientes computacionais diferentes, equipados com processadores Intel e AMD. Os resultados demonstraram que, para a maioria dos kernels do NPB-CPP, aumentar a quantidade de threads pode promover uma maior eficiência energética, exceto na aplicação MG, na qual o incremento no número de threads provocou maior gasto de energia, superando o consumo da sua implementação sequencial apesar da diminuição do tempo de execução. Além disso, observaram-se semelhanças entre a demanda energética dos frameworks OpenMP e OneTBB, enquanto o FastFlow apresentou um maior consumo energético, principalmente em aplicações que realizam acessos frequentes à memória (DRAM), como o benchmark MG.

Para trabalhos futuros, pretende-se fazer uma análise comparativa entre a eficiência energética do NPB-CPP e do NPB-Rust, contrastando as características das linguagens C++ e Rust no contexto da computação de alto desempenho. Além disso, pretende-se realizar esses experimentos em arquiteturas variadas como a ARM, por exemplo. Este trabalho apresentou uma análise inicial do consumo energético das aplicações HPC contidas no NPB-CPP, que é uma implementação do NPB para a linguagem C++. Os experimentos foram realizados em dois ambientes computacionais diferentes, equipados com processadores Intel e AMD. Os resultados demonstraram que, para a maioria dos kernels do NPB-CPP, aumentar a quantidade de threads pode promover uma maior eficiência energética, exceto na aplicação MG, na qual o incremento no número de threads provocou maior gasto de energia, superando o consumo da sua implementação sequencial apesar da diminuição do tempo de execução. Além disso, observaram-se semelhanças entre a demanda energética dos frameworks OpenMP e OneTBB, enquanto o FastFlow apresentou um maior consumo energético, principalmente em aplicações que realizam acessos frequentes à memória (DRAM), como o benchmark MG.

Para trabalhos futuros, pretende-se fazer uma análise comparativa entre a eficiência energética do NPB-CPP e do NPB-Rust, contrastando as características das linguagens C++ e Rust no contexto da computação de alto desempenho. Além disso,

pretende-se realizar esses experimentos em arquiteturas variadas como a ARM, por exem-
plo.

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP, gerido
pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo
n° 2025/20712-2.

Referências

Comissão Europeia (2025). Reducing emissions in aviation. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-aviation_en. Acessado em: 17 nov. 2025.

Costa Neta, I. F. d. (2023). Um estudo sobre consumo energ´etico em supercomputadores. Dissertação (mestrado profissional em tecnologia da informação), Instituto Metrópole Digital, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 96 f.

Cruz, L. (2021). Green software engineering done right: a scientific guide to set up energy efficiency experiments. http://luiscruz.github.io/2021/10/10/scientific-guide.html. Blog post.

Greenpeace (2017). Clicking clean: Who is winning the race to build a green internet? https://www.greenpeace.de/publikationen/20170110_greenpeace_clicking_clean.pdf. Acessado em: 12 de julho de 2023.

Kempen, N. v., Kwon, H.-J., Nguyen, D. T., and Berger, E. D. (2025). It's not easy being green: On the energy efficiency of programming languages. In 2025 40th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE), page 1553–1565. IEEE Press.

Löff, J., Griebler, D., Mencagli, G., Araujo, G., Torquati, M., Danelutto, M., and Fernandes, L. G. (2021). The nas parallel benchmarks for evaluating c++ parallel programming frameworks on shared-memory architectures. Future Generation Computer Systems, 125:743–757.

Ostapenco, V., Lefévre, L., Orgerie, A.-C., and Fichel, B. (2025). Exploring rapl as a power capping leverage for power-constrained infrastructures. In Zhu, T., Li, J., and Castiglione, A., editors, Algorithms and Architectures for Parallel Processing, pages 323–333, Singapore. Springer Nature Singapore.

Queiroz de Medeiros, S., Borges Nogueira, M., and Quezado, G. (2025). Investigating the energy consumption of c++ and java solutions mined from a programming contest site. Journal of Computer Languages, 84:101341.

Anexos

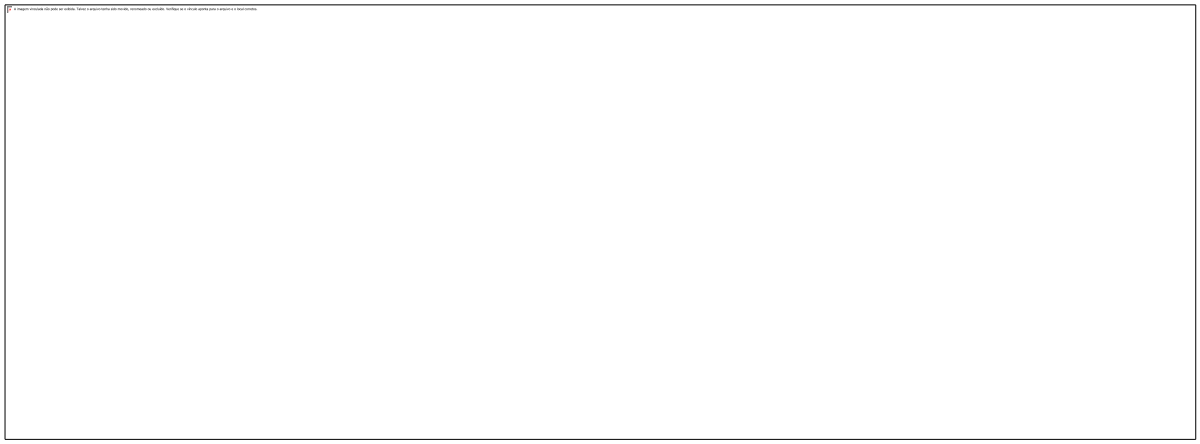


Figura 1. Consumo energético e tempo de execução do benchmark EP em função da quantidade de threads, na máquina Intel

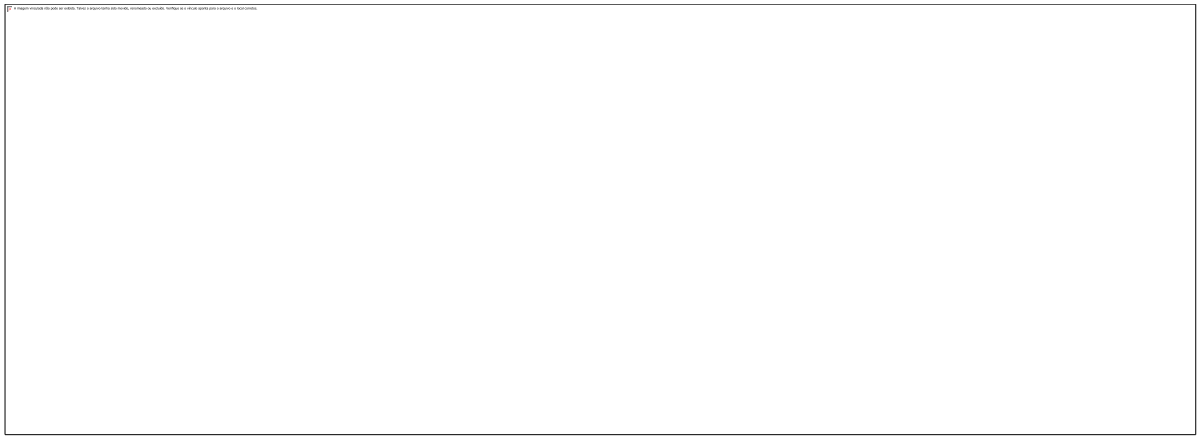


Figura 2. Consumo energético e tempo de execução do benchmark EP em função da quantidade de threads, na máquina AMD

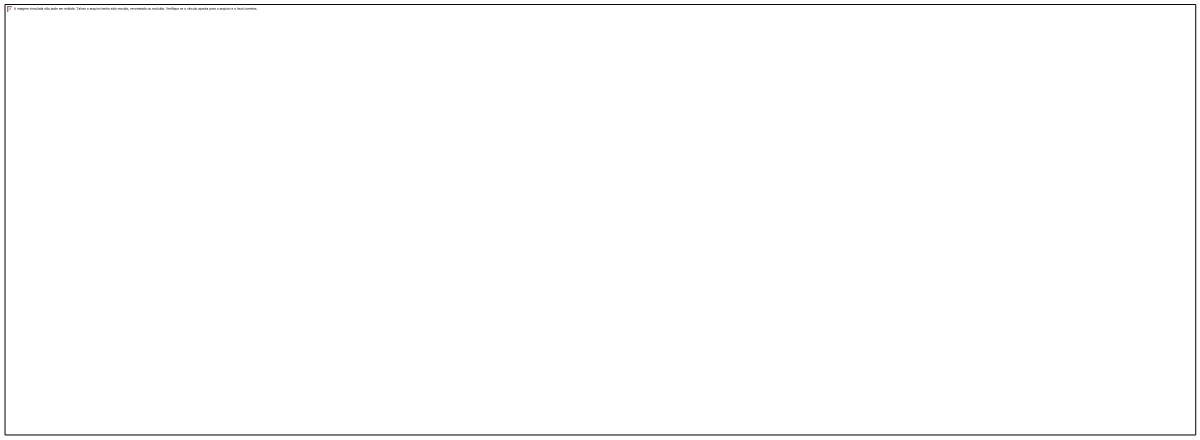


Figura 3. Consumo energético e tempo de execução do benchmark MG em função da quantidade de threads, na máquina Intel

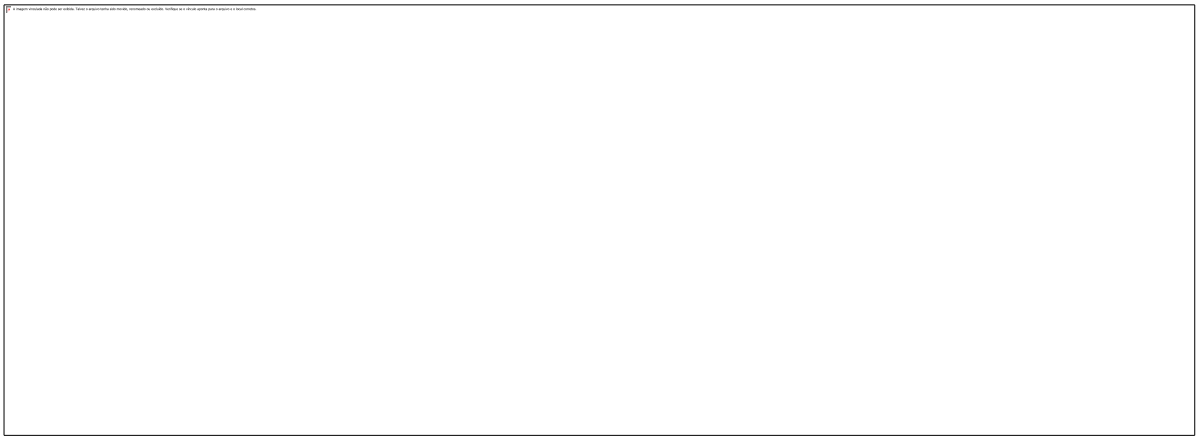


Figura 4. Consumo energético e tempo de execução do benchmark MG em função da quantidade de threads, na máquina AMD

CÓDIGO: ET1096

AUTOR: KAIO RENAN RIBEIRO DA SILVA

ORIENTADOR: RONAI MACHADO LISBOA

TÍTULO: Restrições astrofísicas as equações de estado das estrelas de nêutrons

Resumo

Este trabalho dá continuidade a uma sequência de projetos de Iniciação Científica sobre equações de estado e estrutura de estrelas de nêutrons. O estudo de Neves e Lisboa introduziu a Hadrodinâmica Quântica I e o modelo relativístico de campo médio σ − ω, enquantoo trabalho de Guedes e Lisboa retomou a integração numérica das equações de Tolman-Oppenheimer-Volkov e mostrou a importância das interações nucleares na determinação darelação massa-raio. No presente trabalho, o modelo relativístico é implementado numericamentee estendido pela inclusão do méson vetorial isovetorial ρ. O objetivo principal é resolver numericamente e comparar diretamente os modelos σ − ω e σ − ω − ρ e identificar quais propriedades da matéria e da estrela são modificadas pelo novo vetor isovetorial. Os resultados mostram queo campo ρ altera fortemente a composição da matéria em equilíbrio beta e a energia de simetria, mas produz pequena variação na massa máxima da estrela para a parametrização considerada.

Palavras-chave: estrelas de nêutrons; modelo de Walecka; méson ρ eso;

TITLE: Extension of the σ-ω model through the inclusion of the ρ meson in the study of neutron stars

Abstract

This work continues a series of undergraduate research projects concerning equations of state and the structure of neutron stars. The study by Neves and Lisboa introduced Quantum Hadrodynamics I and the relativistic σ–ω mean-field model, while the work by Guedes and Lisboa revisited the numerical integration of the Tolman-Oppenheimer-Volkoff equations and demonstrated the importance of nuclear interactions in determining the mass-radius relationship. In the present work, the relativistic model is numerically implemented and extended to include the isovector-vector ρ meson. The primary objective is to numerically solve and directly compare the σ–ω and σ–ω–ρ

models, identifying which properties of the matter and the star are modified by the new isovector-vector field. The results show that the ρ field significantly alters the composition of matter in beta equilibrium and the symmetry energy, yet produces only a slight variation in the star's maximum mass for the parameterization considered.

Keywords: neutron stars; Walecka model; ρ meson; eso;

Introdução

A estrutura de estrelas de nêutrons é determinada pela equação de estado (EoS) da matéria densa, P(ϵ), que alimenta as equações de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) para obter a relação massa-raio [1, 2, 3]. Trabalhos anteriores da UFRN desenvolveram essa descrição via modelo σ − ω da Hadrodinâmica Quântica I (QHD-I) [4, 5] e pela integração numérica TOV com EoS fenomenológicas [6]. O presente trabalho estende essa abordagem ao implementar um modelo relativístico de campo médio (RMF) autoconsistente e incluir o méson vetorial isovetorial ρ.
Na aproximação de campo médio, a matéria é uniforme e os potenciais médios escalar (S), vetorial (W) e isovetorial (R) são definidos por:
[eq1]
O campo escalar altera a massa dos núcleons, definindo a massa efetiva e a energia cinética relativística:
[eq2][eq3]
Em unidades naturais ($h^{-} = c = 1$), a densidade numérica de cada espécie e a densidade bariônica total são dadas por:
[eq4][eq5]
A densidade escalar dos núcleons ns é dada por:
[eq6]
Incluindo as autointerações não lineares do campo escalar [7], a equação de campo para σ e a equação equivalente para S escrevem-se:
[eq7][eq8]
Para os campos vetoriais isoescalar (W) e isovetorial (R):
[eq9][eq10]
O potencial R é nulo em matéria simétrica, mas não nulo em matéria assimétrica ($R < 0$ para $nn > np$). Os potenciais químicos dos férmions são:
[eq11][eq12][eq13]
No interior de uma estrela de nêutrons fria e transparente a neutrinos, a composição da matéria é determinada pelo equilíbrio beta associado ao decaimento de nêutrons e seu processo inverso. Como os neutrinos escapam livremente da estrela ($\mu\nu = 0$), a condição de equilíbrio químico e a exigência de neutralidade elétrica resultam em:
[eq14][eq15]
As Eqs. (5), (8), (9), (10), (14) e (15) formam o sistema autoconsistente resolvido a cada densidade bariônica nB. As contribuições cinéticas dos núcleons e elétrons para a densidade de energia e a pressão são:
[eq16][eq17][eq18][eq19]
Reunindo o potencial de autointeração escalar
[eq20]
a densidade de energia e a pressão totais no modelo σ − ω − ρ valem:
[eq21][eq22][eq23]

O modelo σ −ω é recuperado fazendo gρ = 0 (R = 0), permitindo isolar o papel da interação isovetorial.

Metodologia

Os parâmetros empregados nos cálculos são apresentados na Tabela 1. As massas dos mésons e as constantes de acoplamento correspondem à parametrização NL3 utilizada neste trabalho.
[tabela1]
Os cálculos foram realizados no Wolfram Mathematica. Para cada densidade bariônica nB, foram resolvidas autoconsistentemente as equações dos campos médios e, no caso da matéria estelar, as condições de equilíbrio beta e neutralidade elétrica. Utilizouse a parametrização NL3 para os setores mesônicos, incluindo as auto-interações não lineares do campo escalar [9]
O procedimento numérico foi dividido em três etapas. Primeiro, o código foi testado em matéria nuclear simétrica, verificando-se a densidade de saturação e a energia de ligação para uma sequência de densidades bariônicas fornecendo
[eq24]
e, eliminando-se nB, obtém-se a equação de estado barotrópica
[eq25]
Essa equação estabelece a conexão entre a descrição microscópica da matéria nuclear e aestrutura macroscópica da estrela. Em seguida, foi incluída a assimetria de isospin para calcular a energia de simetria e estudar o papel do campo ρ. Finalmente, foram determinadas a composição da matéria npe em equilíbrio beta e as relações ϵ(nB) e P(nB), das quais foi construída a EoS barotrópica P(ϵ). Para uma configuração estática, esfericamente simétrica e constituída por um fluido perfeito, a estrutura estelar é determinada pelas equações de Tolman-OppenheimerVolkov,
[eq26][eq27]
Para uma pressão central Pc, a integração é iniciada com m(0) = 0 e prossegue até a condição P(R) = 0, que define o raio da estrela. A massa gravitacional correspondente é M = m(R). A repetição desse procedimento para diferentes pressões centrais produz a sequência massa-raio M(R) e permite determinar a configuração de massa máxima [1, 2, 3].
O objetivo deste trabalho é, portanto, implementar numericamente essa formulação relativística de campo médio, verificar inicialmente suas propriedades para matéria nuclear simétrica e, em seguida, estudar matéria assimétrica e matéria estelar em equilíbrio beta. A comparação principal foi realizada repetindo exatamente o mesmo procedimento para os modelos σ-ω e σ-ω-ρ. Portanto, a diferença entre os resultados decorre da presença ou ausência do setor isovetorial ρ.

Resultados e Discussões

Do modelo σ − ω ao σ − ω − ρ
A principal diferença conceitual entre os trabalhos anteriores e o presente cálculo está resumida na figura 1
[figura1]

No setor isoescalar, os resultados dos modelos σ − ω e σ − ω − ρ permanecem próximos. O campo ω depende essencialmente da densidade bariônica total e o campo σ é determinado autoconsistentemente pela densidade escalar. A nova física aparece principalmente no setor isovetorial: para matéria rica em nêutrons, R≠ 0 e os potenciais químicos de prótons e nêutrons são deslocados em sentidos opostos.

A composição da máteria

A consequência mais clara da inclusão do méson ρ ocorre na fração de prótons.

[eq28]

No modelo σ −ω, a fração de prótons cresce lentamente com a densidade e chega a aproximadamente Y p0.11 na região de maior densidade estudada. Quando o campo ρ é incluído, a fração cresce de forma muito mais acentuada, atingindo aproximadamente

[eq29]

em nB ≈ 1fm3 . Portanto, o principal efeito do méson ρ não é simplesmente adicionar um termo à energia e à pressão. Ao alterar μnμp, o campo modifica a própria solução do equilíbrio beta e, consequentemente, os momentos de Fermi, as frações de partículas e todas as contribuições cinéticas da EoS. Esse resultado explicita a relação entre o campo ρ e a energia de simetria da matéria nuclear.

A comparação direta é mostrada na Figura 2. A separação crescente entre as duas curvas com a densidade torna visível o efeito do setor isovetorial sobre a composição da matéria beta-estável.

[figura2]

Outro modo de visualizar a diferença entre os modelos é comparar diretamente os campos médios. A Figura 3 mostra que os setores isoscalares S e W permanecem muito próximos, enquanto o novo potencial isovetorial R é diferente de zero apenas no modelo σ − ω − ρ.

Equação de estao e relação massa-raio

As EoS obtidas com e sem o campo ρ foram utilizadas independentemente nas equações TOV. Apesar da diferença importante na composição microscópica, as configurações de massa máxima são bastante próximas, como mostra a figura 4.

A inclusão do campo ρ modifica a massa máxima em apenas

[eq30]

ou aproximadamente 0.14%. O raio da configuração de massa máxima, por outro lado, aumenta de 12.977 km para 13.220 km, uma diferença de aproximadamente 0.24 km ou 1.9%. A pressão central diminui cerca de 0.76%.

[figura3]

[figura4]

A Figura 5 resume a consequência macroscópica dessas duas EoS. Embora a composiçãomicroscópica seja significativamente diferente, as curvas permanecem próximas na região de massas elevadas e atingem praticamente a mesma massa máxima. O deslocamento mais visível ocorre no raio. Esses resultados mostram que, para os parâmetros utilizados, a massa máxima continua sendodeterminada predominantemente pelo balanço entre a atração escalar associada ao campo σ e a repulsão vetorial associada ao campo ω. O setor ρ é fundamental para distinguir prótons e nêutrons e descrever a energia de simetria, mas sua influência sobre Mmax é pequena.

[figura5]

A comparação com os trabalhos anteriores também é instrutiva. Neves e Lisboa [4] apresentaram o modelo σ − ω como a base relativística para incorporar a interação nuclear. Guedese Lisboa [6], utilizando EoS fenomenológicas, obtiveram Mmax = 2.810M⊙ para o modelo deinteração empírica e 2.437M⊙ para Skyrme. O presente resultado Mmax ≈ 2.79M⊙ para o RMF mostra que a implementação autoconsistente σ

− ω produz uma estrela de massa máxima próxima daquela obtida com a EoS empírica, enquanto a extensão σ −ω −ρ preserva praticamente essa massa máxima e modifica principalmente a composição e, em menor grau, o raio.
Deve-se ressaltar que não foi utilizada uma EoS específica para a crosta. Assim, a região de baixas massas das curvas massa-raio não deve ser interpretada quantitativamente. A comparaçãoentre os dois modelos é mais robusta nas massas moderadas e elevadas, pois ambos foram submetidos ao mesmo tratamento numérico e à mesma aproximação para baixas densidades.

Conclusão

O presente trabalho completa uma etapa iniciada nos projetos anteriores sobre estrelas de nêutrons. O estudo de Neves e Lisboa estabeleceu a formulação σ − ω da QHD-I como modelo relativístico para a interação núcleon-núcleon, enquanto Guedes e Lisboa consolidaram a implementação numérica das equações de estado e das equações TOV e indicaram como continuação a construção de uma EoS relativística autoconsistente. Essa continuação foi realizada com a implementação dos modelos σ−ω e σ−ω−ρ. A comparaçãodireta permite identificar claramente o papel do novo campo. Os mésons σ e ω continuam controlando principalmente a dinâmica isoescalar e o suporte da estrela contra o colapso gravitacional. O méson ρ, por sua vez, introduz a resposta isovetorial necessária para distinguir nêutrons e prótons em matéria assimétrica. O efeito mais importante do campo ρ aparece na composição da matéria em equilíbrio beta: em altas densidades, a fração de prótons aumenta de aproximadamente 0.11 para 0.27. Em contraste, a massa máxima varia somente de 2.7941M⊙ para 2.7902M⊙. O raio correspondente à massa máxima aumenta cerca de 0.24 km. Portanto, a principal conclusão da comparação é que a inclusão do méson ρ modifica fortemente propriedades microscópicas ligadas à assimetria de isospin, sem produzir, para a parametrização utilizada, uma alteração igualmente grande na massa máxima da estrela. O resultado evidencia por que o modelo σ − ω constitui uma boa base para a descrição do setor isoescalar, mas também por que sua extensão σ−ω−ρ é necessária para uma descrição mais completa da matéria rica em nêutrons encontrada no interior das estrelas de nêutrons.

Referências

[1] R. C. Tolman, Static solutions of Einstein's field equations for spheres of fluid, Physical Review 55, 364–373 (1939).
[2] J. R. Oppenheimer and G. M. Volkoff, On massive neutron cores, Physical Review 55, 374–381 (1939).
[3] I. Sagert, M. Hempel, C. Greiner and J. Schaffner-Bielich, Compact stars for undergraduates, European Journal of Physics 27, 577–610 (2006).
[4] S. Neves and R. Lisboa, A Física Nuclear das Estrelas de Nêutrons, XXX Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil (2019).
[5] J. D. Walecka, A theory of highly condensed matter, Annals of Physics 83, 491–529 (1974).

[6] K. Guedes and R. Lisboa, Métodos numéricos para solução de equações relativísticas de uma estrela de nêutrons. Parte IV, XXXV Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil (2024).
[7] B. D. Serot and J. D. Walecka, The relativistic nuclear many-body problem, Advances in Nuclear Physics 16, 1–327 (1986).
[8] N. K. Glendenning, Compact Stars: Nuclear Physics, Particle Physics, and General Relativity, 2nd ed., Springer, New York (2000).
[9] G. A. Lalazissis, J. König and P. Ring, New parametrization for the Lagrangian density of relativistic mean field theory, Physical Review C 55, 540–543 (1997).

Anexos



capa relatório



02



03





05





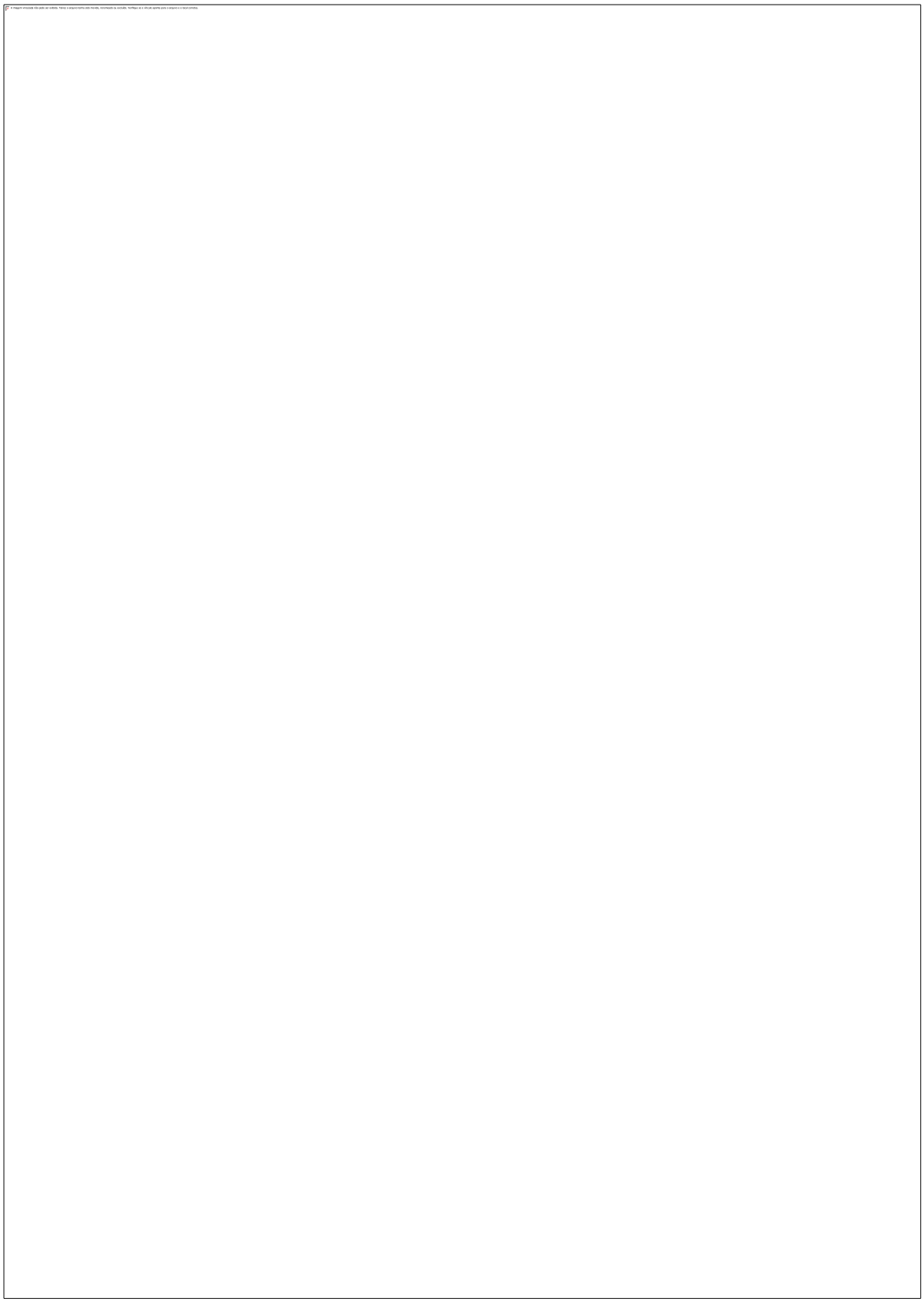
07





09









13 - referencias

CÓDIGO: ET1158

AUTOR: DIANA MOURA SILVA

COAUTOR: JOÃO VICTOR FERREIRA LACERDA AIRES

COAUTOR: JOAO PAOLO CAVALCANTE MARTINS OLIVEIRA

ORIENTADOR: LEONARDO ANDRADE DE ALMEIDA

TÍTULO: Busca e caracterização de exoplanetas e exoluas no sistema planetário Kepler 1514

Resumo

O estudo dos planetas descobertos fora do sistema Solar representa uma das áreas de maior ascensão da Astrofísica Moderna. Já foram confirmados mais de 6300 exoplanetas até o momento. A caracterização precisa dos elementos orbitais e a compreensão da dinâmica são fundamentais para prever a evolução desses sistemas, assim como para detectar novos corpos (como por exemplo outros exoplanetas e exoluas) ligados a eles gravitacionalmente. Neste contexto, investigamos as causas da variação de período orbital no exoplaneta Kepler-1514 b, através da análise dos trânsitos planetários, em busca de novos exoplanetas e/ou exoluas. A partir dos dados da missão Kepler, obtivemos os instantes de meio de trânsito para cada trânsito do exoplaneta e construímos o diagrama observado menos calculado (O–C), subtraindo uma efeméride linear destes valores. As variações no diagrama O-C foram analisadas sob a luz da possibilidade de existência de exoluas orbitando Kepler-1514b, já levantada na literatura. Os resultados mostram que as oscilações e periodicidades observadas no diagrama O–C foram reproduzidas integralmente pela presença e órbita desse segundo planeta com massa aproximadamente 60 massas da Terra e não sobrou nenhum sinal residual ou anomalia orbital substancial que justificasse a presença de um corpo adicional, tornando improvável a hipótese de uma exolua no sistema Kepler-1514. Os resultados corroboram com o modelo de dois exoplanetas já sugerido na literatura.

Palavras-chave: exoplaneta; exolua; Kepler-1514;

TITLE: Search and characterization of exoplanets and exomoons in the Kepler-1514 planetary system

Abstract

The study of planets discovered outside the Solar System represents one of the fastest-growing areas in modern astrophysics. To date, more than 6,300 exoplanets have been

confirmed. The precise characterization of orbital elements and the understanding of dynamics are essential for predicting the evolution of these systems, as well as for detecting new gravitationally bound bodies (such as additional exoplanets and exomoons). In this context, we investigated the causes of orbital period variation in the exoplanet Kepler-1514 b through transit timing analysis in search of new exoplanets and/or exomoons. Using data from the Kepler mission, we obtained the mid-transit times for each transit of the exoplanet and constructed the observed minus calculated (O–C) diagram by subtracting a linear ephemeris from these values. The variations in the O–C diagram were analyzed in light of the potential existence of exomoons orbiting Kepler-1514 b, a possibility previously raised in the literature. The results show that the oscillations and periodicities observed in the O–C diagram were fully reproduced by the presence and orbit of a second planet with a mass of approximately 60 Earth masses. No residual signal or substantial orbital anomaly remained to justify the presence of an additional body, making the exomoon hypothesis in the Kepler-1514 system unlikely. These findings corroborate the two-exoplanet model previously suggested in the literature.

Keywords: exoplanet; exomoon; Kepler-1514;

Introdução

A formação e evolução de sistemas planetários, a caracterização de planetas fora do sistema Solar (exoplanetas) e o estudo detalhado da evolução estelar são essenciais para decifrar o contexto cósmico que permitiu a existência da vida em nosso planeta. Desde 1995, ano da descoberta do primeiro exoplaneta ao redor de uma estrela tipo solar [3], milhares de outros planetas extrasolares foram confirmados, chegando ao marco atual de mais de 6300 exoplanetas detectados [4]. Por outro lado, nenhuma exolua foi confirmada até a presente data. As missões espaciais como KEPLER, TESS, James Webb e diversas outras foram muito importantes para desbravar novos mundos através da ciência. As missões Kepler (2009-2018) [11] e TESS (2018 - hoje) [12] são satélites astronômicos caçadores de exoplanetas cujos dados fotométricos são públicos.

Nas últimas décadas, a técnica do trânsito planetário tem se consolidado como a principal ferramenta para busca de exoplanetas, contribuindo com cerca de 4600 detecções [4]. No trânsito planetário, é observada a redução do brilho coletado da estrela pelo telescópio devido à passagem de um planeta entre a estrela e o observador. Quando colocamos o brilho coletado da estrela em função do tempo, obtemos um gráfico denominado de curva de luz. Os trânsitos planetários se apresentam nestes gráficos como depressões de brilho periodicamente espaçadas. Destes trânsitos, podemos extrair informações sobre o exoplaneta transitante, bem como a presença de outros corpos, e.g. um segundo exoplaneta ou uma possível exolua. Isso é possível pois a presença de um terceiro ou quarto corpo como um exoplaneta ou exolua interage gravitacionalmente no sistema causando variações nos instantes (VIT) ou durações dos trânsitos observados (VDT) [8-10]. Um planeta causa principalmente variação nos instantes e uma exolua causa ambas variações nos instantes e nas durações.

Para o planeta abrigar lua há 3 condições: (a) a distância entre o planeta e a lua ser maior do que o limite de Roche; (b) o centro de massa do sistema situar-se dentro do planeta; (c) a profundidade do trânsito lunar deve ser maior do que o dobro do ruído da

curva de luz, no caso de uma lua transitante. Sob essas condições (a) e (b), consideramos que o planeta Kepler-1514 b pode abrigar satélites naturais.

O estudo aprofundado de exoplanetas, sejam novos ou já confirmados, é fundamental para expandir nossa compreensão sobre a formação, evolução e diversidade dos sistemas planetários no universo, pois descobrir novos mundos amplia nossa amostragem estatística. Continuar estudando sistemas já confirmados nos permite caracterizar com, cada vez maior precisão, a atmosfera, a massa e os parâmetros orbitais desses objetos, além de revelar dinâmicas de longo prazo, como variações de tempo de trânsito, que frequentemente levam à detecção de planetas menores adicionais, exoluas ou novos limites de estabilidade. Assim, podemos entender se as características do nosso sistema Solar são uma regra ou uma exceção no cosmos.

Neste trabalho, a partir de análises de trânsito planetário, investigamos as VITs no exoplaneta Kepler 1514 b [2]. De acordo com [6], o planeta Kepler-1514 b é passível de abrigar até dois satélites naturais. Em contrapartida, [7] exclui o mesmo objeto da lista de candidatos a abrigar luas devido ao planeta estar situado em um sistema multiplanetário. Utilizaremos as VITs e VDTs para propor uma solução de comportamento do sistema planetário Kepler-1514 b, revisitando as hipóteses de um terceiro exoplaneta no sistema planetário, bem como a hipótese da presença de exoluas ao redor de Kepler-1514 b. Ao colaborarmos com pesquisas como estas, o Brasil se coloca em um cenário científico internacional promissor e segue as recomendações do atual Plano Nacional de Astronomia (PNA)[5].

Metodologia

A metodologia usada neste trabalho para atingir os objetivos apontados acima segue os seguintes passos:

(1) Extrair as curvas de luz da estrela Kepler-1514 usando a biblioteca em Python lightkurve [13], contendo os dados de trânsito planetário dos planetas Kepler-1514 b e Kepler-1514 c.

(2) Tratar os trânsitos planetários de Kepler-1514 b através de uma rotina em Python, com o auxílio das bibliotecas wotan, astropy, emcee e batman, além das mais comuns numpy e pandas [14-17]. A biblioteca wotan é utilizada para remover tendências e, portanto, nivelar a curva de luz. A ferramenta astropy permite o programa lidar com conversão de unidades e trabalhar com o tempo astronômico em Dias Julianos no Baricentro (do inglês, Barycentric Julian Date, BJD). Por fim, a ferramenta batman foi utilizada na modelagem das curvas de luz.

(3) Foi utilizado o Método de Monte Carlo com Cadeia de Markov (do inglês, Markov Chain with Monte Carlo, MCMC) através da biblioteca emcee para ajustar os parâmetros dos trânsitos, obter seus parâmetros e a distribuição de probabilidade. O tratamento dos dados permitiu obter o tempo de duração de cada trânsito, o instante de meio dos trânsitos, excentricidade orbital, a proporção entre o raio do planeta e da estrela; semi-eixo maior (fração do semi-eixo maior sobre o raio da estrela) e inclinação.

(4) A partir dos dados de instante de meio de trânsito, subtraímos a efeméride linear ajustada e construímos o diagrama observado menos calculado (O-C), para identificar a existência de VITs. Em termos práticos, o diagrama O-C representa o desvio dos instantes de trânsito observados em relação ao esperado quando a órbita é perfeitamente periódica.

(5) Por fim, analisamos a dinâmica orbital das soluções encontradas via o simulador de N-corpos interagentes gravitacionalmente Rebound [18]. Dessa forma, buscamos verificar se as perturbações observadas no diagrama O-C são compatíveis somente com o segundo planeta Kepler-1514 c ou com um possível exoplaneta ou exolua adicional.

Resultados e Discussões

Os dados extraídos via Lightkurve forneceram um total de 7 trânsitos de Kepler-1514 b (Figura 1). Todos os trânsitos foram tratados e modelados (Figura 2) utilizando as bibliotecas batman e emcee para melhor determinação dos parâmetros de cada trânsito. Na Tabela 1 são apresentados os valores medidos de cada instante e duração de tempos dos trânsitos (ITT e TDT) e na Figura 3 é apresentado o melhor ajuste de uma efeméride linear aos dados de ITT.

Figura 1: Os 7 trânsitos do planeta Kepler 1514-b observados pelo satélite Kepler.

Figura 2: Painel superior: ajuste do primeiro trânsito do planeta Kepler 1514b usando o código do Batman implementado com a rotina do emcee. Painel inferior: resíduos obtidos a partir do ajuste.

Tabela 1: Listagem dos instantes de tempo de trânsito (ITT) em função do ciclo e tempo de duração de cada trânsito (TDT).

Figura 3: Ajuste do modelo linear aos dados medidos dos instantes do meio do trânsito em função do ciclo (N). As medidas são representadas pelos pontos quadrados e o melhor ajuste pela reta sólida azul.

A partir do ajuste da efeméride linear foi montado o gráfico observado menos calculado (O-C) que permite visualizar as VITs para o objeto em estudo. Uma reta horizontal centrada em zero representa um sistema sem VITs. Entretanto, nosso diagrama O-C (Figura 4) mostra uma variação significativa de VIT, portanto foi necessário análises adicionais para entender suas causas.

Figura 4: Diagrama observado menos calculado obtido a partir do ajuste da efeméride linear realizado na Figura 3. Os valores são apresentados com pontos em azul e a linha tracejada representa um modelo sem variação do período orbital do planeta medido.

A combinação da análise do diagrama O–C com as simulações dinâmicas do código Rebound permitiu modelar com precisão as interações gravitacionais do sistema Kepler-1514 b com sua estrela mãe, demonstrando que as variações no instante de trânsito

(VIT) do planeta b são explicadas pela perturbação gravitacional exercida por um segundo planeta (Kepler-1514 c).

A efeméride linear encontrada para o planeta B estão demonstrados na Tabela 2. O período encontrado corrobora com o valor do catálogo, com uma discrepância abaixo de 68% ($\sigma<1$). Enquanto o tempo inicial encontrado possui uma discrepância estatisticamente significativa, acima de 99,8% ($\sigma \approx 7$).

Tabela 2: Valores ajustados da efeméride linear em comparação com os dados da literatura.

Como observa-se no gráfico da Figura 4, apenas os ciclos 0 e 1 possuem variação significativa, enquanto os ciclos de 2 a 6 não possuem. A nossa análise da dinâmica orbital usando o simulador de N-corpos Rebound sugere um planeta já reportado na literatura, Kepler 1514-c [1], cujos parâmetros de massa e excentricidade obtidos estão descritos na Tabela 3 e o período manteve-se o citado na literatura [1]. Além disso, descarta a possibilidade de uma exolua, uma vez que os resíduos do ajuste Kepler 1514-c não apresentam outros sinais significativos. Já a análise da variação de duração dos trânsitos (Fig. 5) mostrou que não há sinal VDT significativo, sendo essas pequenas variações consideradas ruídos.

Figura 5:Duração do tempo dos 7 trânsitos em função do ciclo (N). As medidas são representadas pelos pontos laranjas e as barras representam a margem de erro.

Tabela 3: Parâmetros obtidos para o terceiro corpo Kepler 1514-c. Nota: Foi utilizado o período orbital da literatura

Conclusão

O estudo de exoplanetas e seus sistemas originários permite entender melhor a formação e evolução do nosso próprio sistema solar. Uma vez que o número de exoplanetas descobertos já superou 6300, mas nenhuma exolua fora ainda confirmada, há uma grande importância em refazer os estudos de detecção para buscar novas interpretações e resultados. No sistema Kepler-1514 b, a variação do período orbital sugere que este possui VITs, que podem ser geradas pelo seu companheiro planetário Kepler-1514 c ou devido a outros corpos no sistema (exoplanetas ou exoluas).

Os resultados mostram que as oscilações e periodicidades observadas no diagrama O–C foram reproduzidas integralmente pela presença e órbita desse segundo planeta gigante e não sobrou nenhum sinal residual ou anomalia orbital substancial que justificasse a presença de um corpo adicional, tornando a hipótese de uma exolua dinâmica e gravitacionalmente detectável no sistema Kepler-1514 improvável. Os resultados deste trabalho corroboram com a existência somente do exoplaneta e descartam a presença de outros corpos (exolua) no sistema, fortalecendo o modelo de dois exoplanetas já sugerido na literatura [19].

Referências

[1] ARMSTRONG, David J.; GAMPER, Jevgenij; DAMOULAS, Theodoros. Exoplanet validation with machine learning: 50 new validated Kepler planets. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 504, n. 4, p. 5327-5344, jul. 2021. [2] MORTON, Timothy D. et al. False positive probabilities for all Kepler Objects of Interest: 1284 newly validated planets and 428 likely false positives. The Astrophysical Journal, v. 822, n. 2, id. 86, p. 1-15, maio 2016. [3] MAYOR, M.; QUELOZ, D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. Nature, London, v. 378, n. 6555, p. 355-359, nov. 1995. ISSN 0028-0836. [4] NASA EXOPLANET ARCHIVE. Exoplanet and Candidate Counts. IPAC/Caltech, 2026. Disponível em: https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html. Acesso em: 22 jul. 2026. [5] BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas Estratégicos. Plano Nacional de Astronomia. Brasília, DF: MCTI, 2025. 178 p. [6] GUIMARÃES, Ana; VALIO, Adriana. The Best Planets to Harbor Detectable Exomoons. The Astronomical Journal, v. 156, n. 2, id. 50, p. 1-8, ago. 2018. [7] KIPPING, David; YAHALOMI, Daniel A. A search for transit timing variations within the exomoon corridor using Kepler data. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 518, n. 3, p. 3482-3493, 2023. [8] SARTORETTI, Paola; SCHNEIDER, Jean. On the detection of satellites of extrasolar planets with the transit method. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, v. 134, n. 3, p. 553-560, fev. 1999. [9] AGOL, Eric; STEFFEN, Jason; SARI, Re'em; OHTA, Yasuhiro. On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 359, n. 2, p. 567-579, maio 2005. [10] HOLMAN, Matthew J.; MURRAY, Norman W. The Use of Transit Timing to Detect Terrestrial Planets. Science, v. 307, n. 5713, p. 1288-1291, fev. 2005. [11] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Kepler and K2 Mission. NASA Science, 2026. Disponível em: https://science.nasa.gov/mission/kepler/. Acesso em: 22 jul. 2026. [12] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). NASA Science, 2026. Disponível em: https://science.nasa.gov/mission/tess/. Acesso em: 30 jul. 2026. [13] Lightkurve Collaboration; Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python. Astrophysics Source Code Library, dec. 2018 [14] HIPPKE, Michael; DAVID, Trevor J.; MULDERS, Gijs D.; HELLER, René. Wōtan: Comprehensive Time-series Detrending in Python. The Astronomical Journal, v. 158, n. 4, p. 143 (15pp), out. 2019 [15] Laura Kreidberg; batman: BAsic Transit Model cAlculatioN in Python. The Astronomical Society of the Pacific, v. 127, n. 957. 2015 [16] Daniel Foreman-Mackey, et al. emcee: The MCMC Hammer. The Astronomical Society of the Pacific, vol 125, n. 925. fev. 2013 [17] Astropy Collaboration; Astropy: A community Python package for astronomy. Astronomy & Astrophysics, v. 558, A33. oct. 2013 [18] H. Rein, S.-F. Liu;

REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics. Astronomy & Astrophysics, v. 537, A128, jan. 2012 [19] DALBA, Paul A. et al. Giant Outer Transiting Exoplanet Mass (GOT 'EM) Survey. I. Confirmation of an Eccentric, Cool Jupiter with an Interior Earth-sized Planet Orbiting Kepler-1514. The Astronomical Journal, v. 161, n. 3, id. 103, p. 1-13, mar. 2021.

Anexos



Tabela 1: Listagem dos instantes de tempo de trânsito (ITT) em função do ciclo e tempo de duração de cada trânsito (TDT).

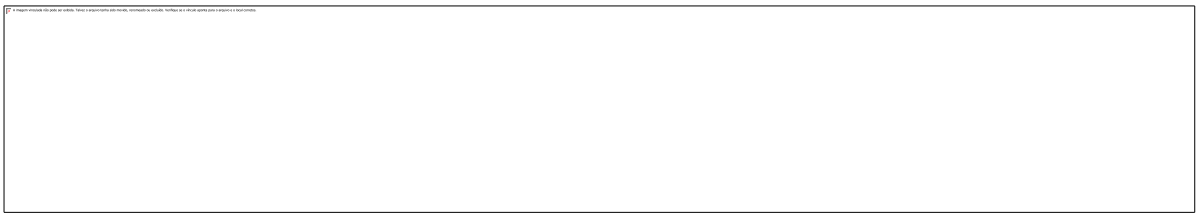


Tabela 2: Valores ajustados da efeméride linear em comparação com os dados da literatura.



Tabela 3: Parâmetros obtidos para o terceiro corpo Kepler 1514-c. Nota: Foi utilizado o período orbital da literatura

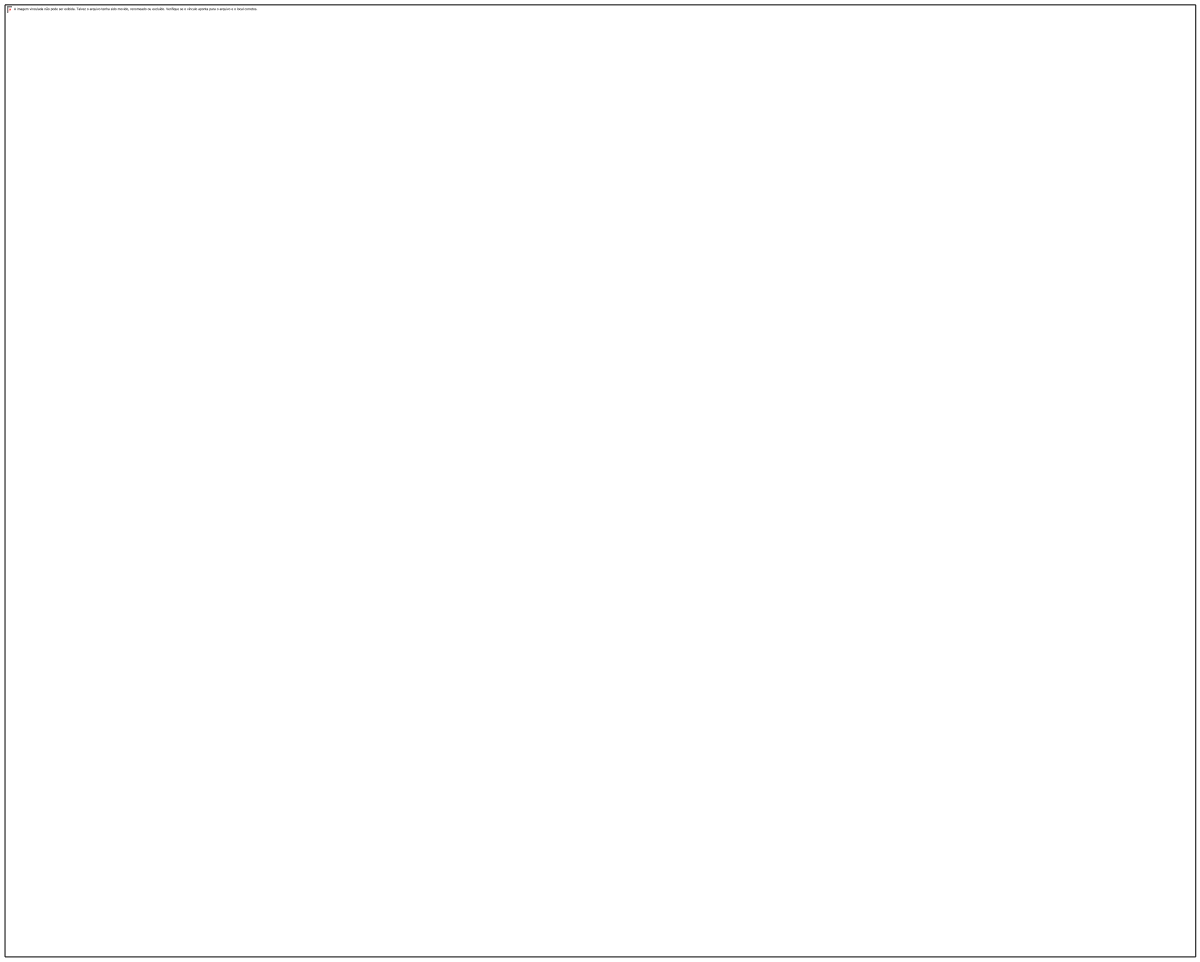


Figura 1: Os 7 trânsitos do planeta Kepler 1514-b observados pelo satélite Kepler.

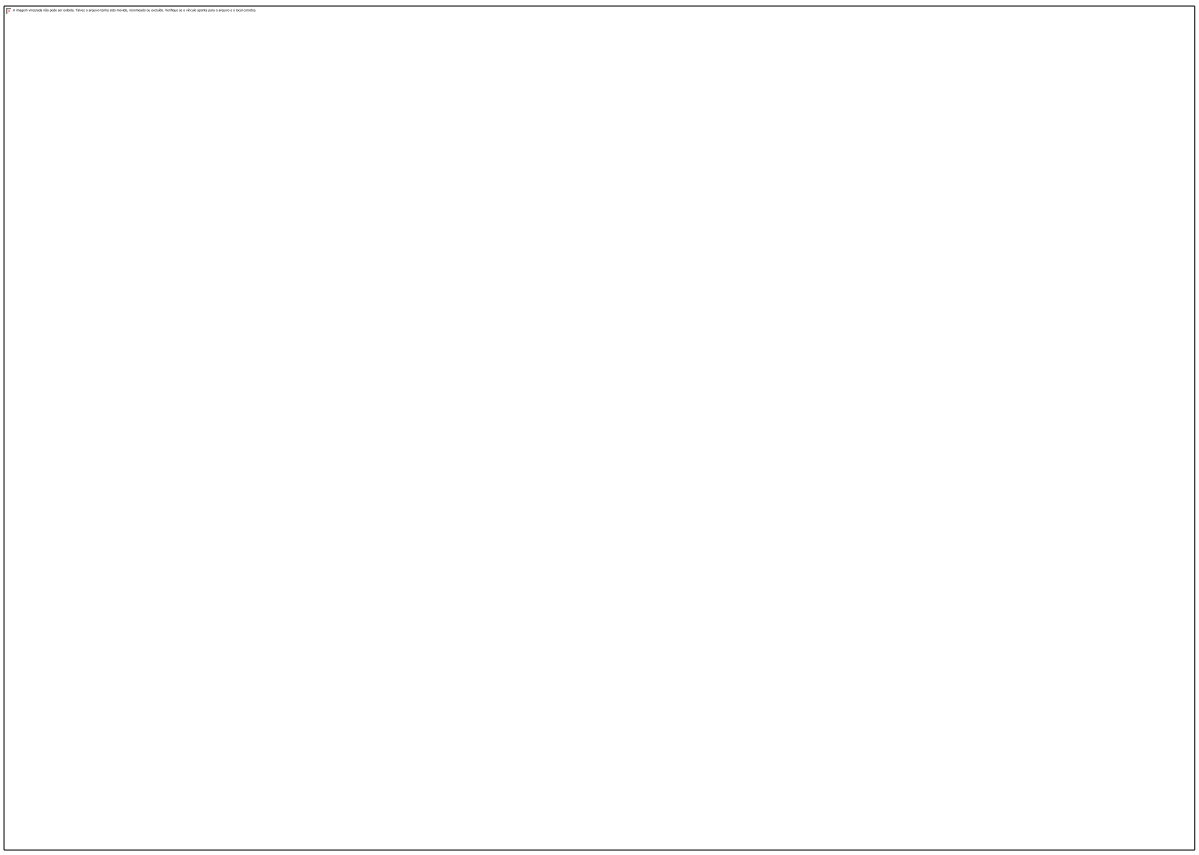


Figura 2: Painel superior: ajuste do primeiro trânsito do planeta Kepler 1514b usando o código do \textit{Batman} implementado com a rotina do \textit{emcee}. Painel inferior: resíduos obtidos a partir do ajuste.

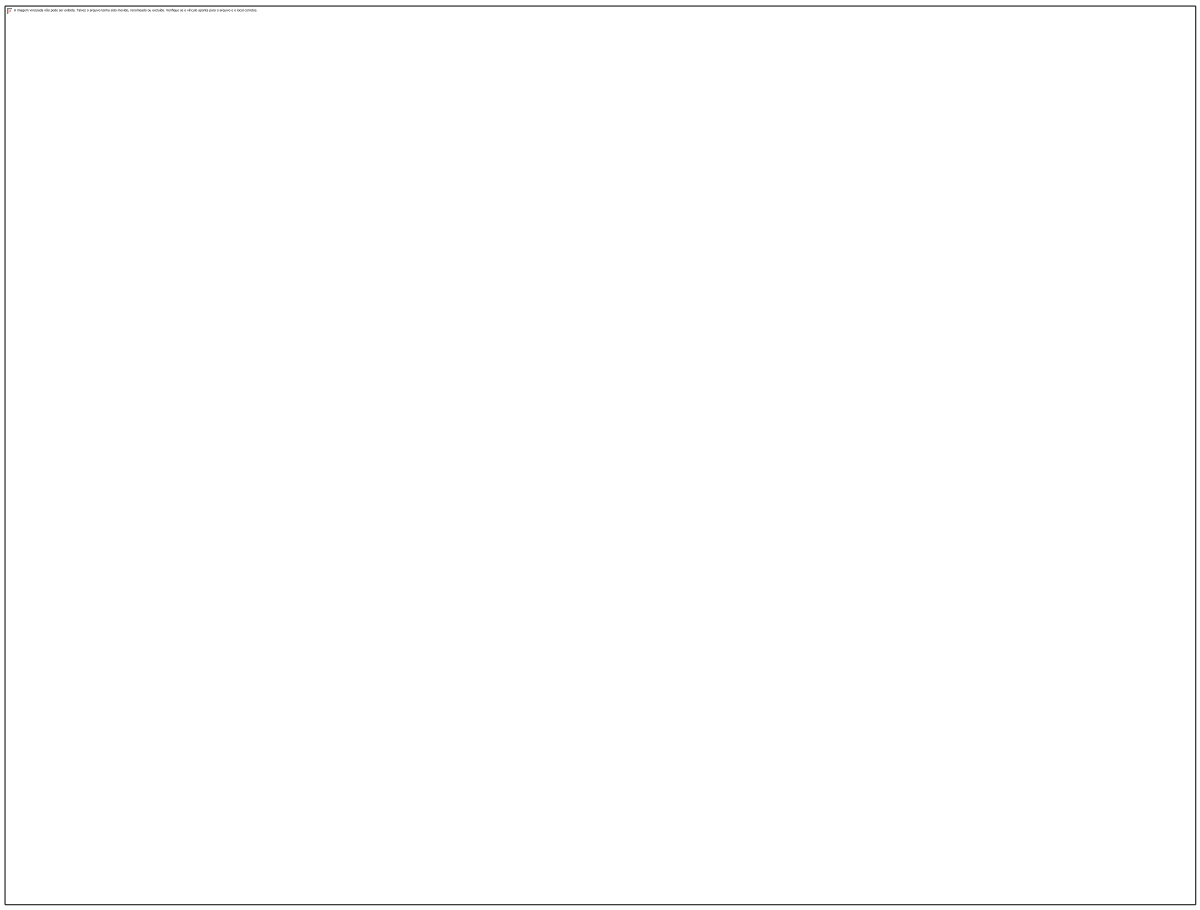


Figura 3: Ajuste do modelo linear aos dados medidos dos instantes do meio do trânsito em função do ciclo (N). As medidas são representadas pelos pontos quadrados e o melhor ajuste pela reta sólida azul.



Figura 4: Diagrama observado menos calculado obtido a partir do ajuste da efeméride linear realizado na Figura 3. A linha amarela representa a modelagem do sistema com o terceiro corpo, planeta Kepler 1514-c.



Figura 5: Duração do tempo dos 7 trânsitos em função do ciclo (N). As medidas são representadas pelos pontos laranjas e as barras representam a margem de erro.

CÓDIGO: ET1272

AUTOR: ICARO BRUNO SILBE CORTÊS

ORIENTADOR: LEO GOUVEA MEDEIROS

TÍTULO: Medidas Cosmológicas da Parametrização do Índice de Crescimento

Resumo

Sob a luz de recentes resultados das análises de dados de oscilações acústicas bariônicas (BAO) do Dark Energy Spectroscopy Instrument (DESI), que demonstram uma preferência para energia escura dinâmica num intervalo de 2,8 − 4,2σ, e a medida de um alto índice de crescimento (gamma) no modelo LCDM, nós determinamos pela primeira vez vínculos sobre gamma para energia escura dinâmica no modelo de fundo w0waCDM. Para estes resultados, empregamos combinações de dados da radiação cósmica de fundo do Planck, dados de f-sigma8, dados de BAO do DESI e distâncias de luminosidade de supernovas Ia. Os resultados do conjunto de dados com somente Planck produziram apenas gamma=0,611+0,074-0,093 e a combinação de todos os conjuntos de dados produziram gamma=0,633+-0,024, correspondendo exatamente com os resultados já encontrados na literatura para o LCDM, mostrando que uma cosmologia de fundo mais geral não impacta a determinação do índice de crescimento.

Palavras-chave: Cosmologia. Energia Escura. Estruturas de Larga Escala.

TITLE: Cosmological Measurements of the Growth Index Parametrization

Abstract

In light of the recent results of baryon acoustic oscillation (BAO) data analysis from the Dark Energy Spectroscopy Instrument (DESI), which demonstrates a preference for a dynamical dark energy ranging from 2.8 − 4.2σ, and the measurement of a high growth index (gamma) in the LCDM model, we determine for the first time constraints on gamma for dynamic dark energy in the w0waCDM background model. For those results, we employed combinations of data from Planck cosmic microwave background data, f-sigma8 data, BAO data from DESI and supernova Ia luminosity distances. The results from Planck dataset only yielded gamma=0.611+0.074-0.093 and the combination of all datasets produced gamma=0.633+-0.024 matching exactly the results

already found in literature for LCDM, showing that a more general background cosmology does not impact the growth index determination.

Keywords: Cosmology. Dark Energy. Large Scale Structures.

Introdução

Com o objetivo de entender melhor a energia escura e suas propriedades físicas, o Dark Energy Spectroscopy Instrument (DESI) vem produzindo resultados que indicam com cada vez mais confiança que a equação de estado da energia escura é do tipo dinâmica, i.e., que varia conforme a evolução do Universo, com resultados excluindo o caso de constante cosmológica (modelo LCDM) com 2,8 a 4,2σ [1]. Um dos possíveis impactos mensuráveis de uma energia escura dinâmica é na taxa de crescimento de estruturas de larga escalada, representada pela Eq. (1) do anexo, onde f(a) é chamada a taxa de crescimento linear de estruturas.

Uma parametrização conveniente da taxa de crescimento é apresentada na Eq. (2) no anexo, onde f(a) é aproximada pelo parâmetro de densidade de matéria elevado ao índice de crescimento, γ [2]. Considerando que o parâmetro de densidade de energia escura se relaciona diretamente com o de matéria, pela Eq. (3) no anexo para baixos redshifts z (desconsiderando outros componentes do Universo), fica claro que vincular γ é um caminho para relacionar diretamente medidas de crescimento de estruturas com os parâmetros de densidade da cosmologia de fundo.

Aplicando a teoria de crescimento linear de estruturas ao modelo padrão LCDM, refs. [2,3] encontraram γ = 0,55 e em particular, usando dados de cronômetros cósmicos, ref. [4] encontrou um ajuste de γ = 0,551+-0,001 com erros tipicamente inferiores a 0,2% mesmo para um amplo espaço de parâmetros, minimamente restritos por dados de cronômetros cósmicos.

Por outro lado, permitindo que o índice de crescimento varie livre de modelos teóricos, um primeiro vínculo de γ baseado em dados observacionais foi feito pela ref. [5] assumindo o modelo de fundo LCDM e usando dados de radiação cósmica de fundo (CMB) do Planck, dados de crescimento de estruturas na forma de fσ8(z), dados de oscilações acústicas bariônicas (BAO) do SDSS e de aglomerações de galáxias do DES-Y1. Nesse trabalho, conseguiram restringir o índice de crescimento observacionalmente num valor significativamente alto de γ = 0,633+-0,025, excluindo o valor teórico de γ = 0,55 com uma significância de 3,7σ e indicando uma supressão na taxa de crescimento de estruturas.

Algumas explicações para esta discordância foram propostas. Por exemplo, ref. [4] explorou como diferentes parametrizações de energia escura dinâmica podem afetar as determinações teóricas de γ, considerando também modelos de energia escura aglomerativa. Como resultado, mostraram que nenhum desses modelos é capaz de alterar o suficiente o valor do índice de crescimento. Já a ref. [6] apontou que um índice de crescimento alto considerando parametrizações da constante da gravitação variando com o tempo para largas escalas, implica em um acoplamento gravitacional que decai

na época de dominação da energia escura. Por outro lado alguns trabalhos como refs. [7,8,9] argumentam que o valor alto de γ é consequência de escolhas de implementação e da anomalia de amplitude de lenteamento nos dados do Planck.

Considerando o interesse em modelos de energia escura dinâmica e as discussões sobre o valor alto γ, o presente trabalho se propõe a apresentar os primeiros vínculos observacionais do índice de crescimento e sua relação com os diferentes conjuntos de dados. A saber, dados de CMB do Planck [10], da segunda publicação de dados de BAO do DESI [1], de distância de luminosidade de supernovas Ia do Pantheon+ [11] e dados de crescimento de estruturas na forma de fσ8(z), onde σ8 é a amplitude de flutuações de matéria na escala de 8 Mpc/h.

Metodologia

O presente trabalho analisa o conjunto de parâmetros do modelo padrão da cosmologia LCDM sem curvatura, estendendo-o com a possibilidade de variar o índice de crescimento e com uma energia escura dinâmica seguindo a parametrização w0wa da equação de estado, em que w(a) = w0 + wa(1-a) [12,13].

Além disso, os efeitos do índice de crescimento foram implementadas por meio do CAMB_GammaPrime_Growth [5], uma versão modificada do resolvedor de Boltzmann cosmológico CAMB [14,15], que computa a chamada função de crescimento linear, D(z), conforme Eq. (4) do anexo, que é uma integral da Eq. (2). Em posse da função de crescimento linear é possível corrigir a curva de σ8(z) por meio da Eq. (6) e computar f(z) a partir da parametrização da Eq. (2), assim obtendo uma curva de fσ8(γ, z) que pode ser comparada com dados observacionais.

A computação da curva de fσ8(γ, z) foi implementada como função de verossimilhança e compatibilizada com a interface de amostragem da biblioteca Cobaya [16], que também provê implementações de verossimilhança para os demais conjuntos de dados utilizados: dados de correlação TT, EE, TTTEEE e a implementação de lenteamento Clik do Planck [10], conjunto que nomeamos de "PL18"; dados da segunda publicação de dados de BAO do DESI [1]; dados de distância de luminosidade de supernovas Ia do Pantheon+ [11] (que abreviaremos para "PP"); e o mesmo conjunto de dados de fσ8(z) adotados pela ref. [5]. Para discutir sobre a influência de dados do Planck, utilizamos um conjunto de priors gaussianos correlacionados da CMB [17], discutidos junto da Eq. (7) do anexo.

Os vínculos sobre os parâmetros do modelo foram feitos utilizando o amostrador de Cadeia de Markov de Monte Carlo (MCMC) implementado no Cobaya, com os priors seguindo a tabela 1 no anexo, quando aplicável. As distribuições de referência e escala de amostragem foram definidos conforme configuração padrão sugerida pela aplicação cobaya-cosmo-generator e alguns cadeias foram inicializadas reaproveitando a matriz de covariância do conjunto de dados apenas com Planck, para suas respectivas parametrizações. Todas as amostragens foram feitas com 6 cadeias com critério de convergência da estatística de Gelman-Rubin satisfazendo $R-1<0,01$ e obtiveram uma taxa de aceitação de ~35%. O tamanho das amostragens variou de ~10 000 amostras

aceitas para as parametrizações mais simples (LCDM com γ=0,55 e todos os conjuntos de dados) a até ~180 000 para os casos mais complexos.

A análise dos resultados foi feita utilizando a ferramenta GetDist [18] e descartando os primeiros 30% de amostras como "burn-in". Como critérios de escolha de modelos foram utilizados as variações em χ quadrado e o fator de Bayes BF. Para todos estes critérios, a diferença foi computada entre o modelo mais simples M0, com γ fixo em γ=0,55, em comparação ao modelo mais complexo M1, com γ livre.

Por se tratarem de modelos aninhados, é fácil computar o fator de Bayes usando a razão de densidades de Savage-Dickey, que como apresentada na Eq. (8) do anexo, apenas depende da densidade de probabilidade da distribuição posterior marginalizada sobre γ, P(γ|d, M1), dividida pela densidade de probabilidade dos priors sobre γ no modelo mais complexo P(γ|M1)=U[0,2]=1/2, ambos apenas avaliados em γ=0,55. Ambos as probabilidades são rapidamente computáveis via GetDist.

Resultados e Discussões

O melhor ajuste aos principais conjuntos de dados e modelos, e limites marginalizados em 1D com nível de confiança de 68% para os principais parâmetros são listados na Tabela 2 no anexo. Além disso, as correlações marginalizadas entre os pares dos principais parâmetros para o modelos LCDM e w0waCDM são mostradas nas Figura 1 e 3 do anexo, respectivamente.

No caso do LCDM, fica claro que a adição de mais conjuntos de dados apenas faz com que os melhores valores de γ aproximem-se de 0,63 à medida que sua incerteza diminui. Ou seja, mesmo usando DESI DR2+PP no lugar de SDSS+DES, foi possível reproduzir os resultados da ref. [5] de forma bastante consistente, seja para γ como para S8. A seção superior da Tabela 2 deixa claro: todos os conjuntos de dados que incluem dados de fσ8 possuem um valor próximo de

γLCDM=0,635+-0,024

e a inclusão de Pantheon+ sequer altera os limites nos principais parâmetros.

Para o w0waCDM, é interessante notar que mesmo com a inclusão de dos dois parâmetros de energia escura, os vínculos sobre o índice de crescimento são minimamente afetados, obtendo

γw0waCDM=0,633+-0,024

para o conjunto com mais dados, o que inclusive representa limites quase idênticos aos de LCDM. O fato de que, mesmo ao tornar livre os parâmetros w0 e wa, o vínculo de γ não piora, mostra que como discutido na ref. [4], o índice de crescimento não é afetado pela cosmologia de fundo. De fato, na Figura 3, não há nenhuma correlação relevante entre os parâmetros de fundo e γ.

Escolha de modelos

De maneira similar a como a ref. [5] demonstrou que modelos de crescimento onde o γ é livre descrevem melhor os dados em comparação ao modelo padrão, mesmo penalizando a adição de um parâmetro (por meio do BF), para o w0waCDM, também obtivemos uma parametrização preferível. Isto é demonstrado com os critérios de informação da Tabela 3 no anexo.

Considerando apenas a variação do χ quadrado, adotar um γ livre é preferível em todos os casos. Para os demais critérios, quando se utiliza apenas dados do Planck, é desfavorável adicionar o parâmetro livre e não muito favorável quando se acresce os dados de fσ8. Porém, com a adição de DESI, o modelo mais complexo é "fortemente" favorecido, conforme a escala de Jeffrey para o fator de Bayes [19]. Isto demonstra que é estatisticamente preferível adotar um índice de crescimento diferente do padrão, para melhor se ajustar aos dados.

Impactos de lenteamento e verossimilhanças do Planck

Uma das principais explicações à tensão do índice de crescimento aponta que o valor alto do índice de crescimento nas derivações em que se usa apenas dados do Planck está associada à anomalia da amplitude de lenteamento ou a diferentes implementações da função de verossimilhança dos dados do Planck [7,8,9].

No entanto, a Figura 2 no anexo mostra que quando substituímos todas as verossimilhanças do Planck com o conjunto de priors correlacionados da radiação cósmica de fundo, escolhidos para marginalizar sobre efeitos dos dados do Planck, o valor do índice de crescimento permanece alto. Na verdade, o melhor ajuste se encontra na faixa de γ=0,771+-0,079, excluindo o valor padrão com mais de 2,75σ.

Outra evidência contra essa explicação é ilustrada na Figura 4 do anexo, que apresenta os vínculos 1D marginalizados para γ, onde vê-se que os resultados com PL18 não excluem significativamente o valor teórico, mas a medida que mais dados são adicionados, o melhor ajuste tende a valores cada vez maiores, o que significa que o que leva a valores maiores de γ não são apenas os dados do Planck, de modo que problemas relacionados a implementações do Planck não são a principal causa da tensão do índice de crescimento.

Conclusão

Neste trabalho apresentamos os primeiros vínculos observacionais do índice de crescimento considerando a parametrização w0wa de energia escura dinâmica. Os vínculos observados são próximos dos valores para o LCDM [5], o que é consequência da pouca dependência entre o γ e os parâmetros da cosmologia de fundo [4]. De acordo com estes resultados, a tensão de mais de 3,7σ entre o valor teórico e o observado de γ prevalece.

Também mostramos que explicações para a tensão que se apoiam na anomalia de amplitude de lenteamento ou diferentes implementações das funções de verossimilhança Planck não se sustentam, uma vez que outros conjuntos de dados também apontam para valores de γ consistentemente altos.

Dessa forma, permanece a necessidade de encontrar outros modelos teóricos que prevejam supressão na taxa de formação de estruturas, em relação ao modelo padrão, como modelos de gravidade modificada [6] ou de matéria escura não padrão.

Referências

1. M. Abdul Karim et al. (DESI Collaboration), DESI DR2 results II: Measurements of baryon acoustic oscillations and cosmological constraints, arXiv:2503.14738.
2. E. V. Linder, Cosmic growth history and expansion history, Phys. Rev. D 72, 043529 (2005).
3. L.-M. Wang and P. J. Steinhardt, Astrophys. J. 508, 483 (1998), astro-ph/9804015.
4. Í. B. S. Cortês and R. C. Batista, Physical Review D 112 (2025), 10.1103/71jl-gmrn.
5. N.-M. Nguyen, D. Huterer, and Y. Wen, Phys. Rev. Lett. 131, 111001 (2023), arXiv:2302.01331 [astro-ph.CO].
6. Í. B. S. Cortês, L. G. Medeiros, and R. C. Batista, Phys. Rev. D 113, 043541 (2026), 10.1103/gcc3-5k9d
7. E. Specogna, E. Di Valentino, J. Levi Said, and N.-M. Nguyen, Phys. Rev. D 109, 043528(2024), 10.1103/PhysRevD.109.043528.
8. E. Specgona, W. Giarè and E. Di Valentino, Phys. Rev. D **111**, 103510(2025), 10.1103/PhysRevD.111.103510
9. Rong-Gen Cai and Shao-Jiang Wang 2026 _Res. Astron. Astrophys._ **26** 084011
10. N. Aghanim et al. (Planck Collaboration), Astron. Astrophys. 641, A6 (2020); 652, C4(E) (2021).
11. D. Brout _et al_, The Pantheon+ Analysis: Cosmological Constraints, Apj **938**, 110 (2022), 10.3847/1538-4357/ac8e04.
12. M. Chevallier and D. Polarski, Int. J. Mod. Phys. D10, 213 (2001), gr-qc/0009008.
13. E. V. Linder and A. Jenkins, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 346, 573 (2003), astro-ph/0305286.
14. A. Lewis, A. Challinor, and A. Lasenby, Astrophys. J. 538, 473 (2000).
15. C. Howlett, A. Lewis, A. Hall, and A. Challinor, J. Cosmol. Astropart. Phys. 04 (2012) 027.
16. J. Torrado and A. Lewis, J. Cosmol. Astropart. Phys. 05 (2021) 057.
17. M. Abdul Karim et al. (DESI Collaboration), DESI DR2 results II: Measurements of baryon acoustic oscillations and cosmological constraints, arXiv:2503.14738.
18. A. Lewis, J. Cosmol. Astropart. Phys. 08 (2025) 025.
19. Jeffreys, H.: Theory of probability, 3rd edn edn. Oxford Classics series (reprinted 1998). Oxford University Press, Oxford, UK (1961)

Anexos



Formulário, página 1



Formulário, página 2



Figura 1: Vínculos 2D marginalizados para as combinações de parâmetros do modelo LCDM para diferentes conjuntos de dados.

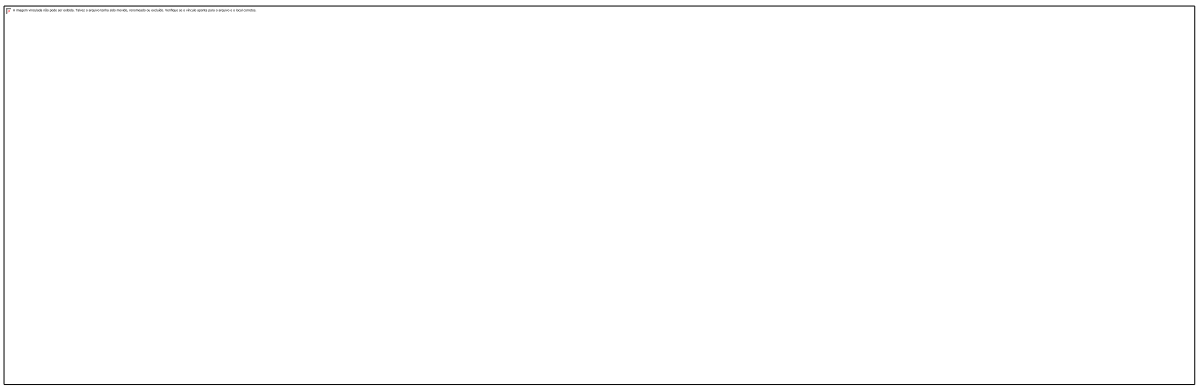


Figura 2: Vínculos 2D marginalizados para as correlações de parâmetros fundamentais do modelo w0waCDM com γ, comparando dados com e sem PL18.



Figura 3: Vínculos 2D marginalizados para as combinações de parâmetros do modelo w0 wa CDM para diferentes conjuntos de dados.

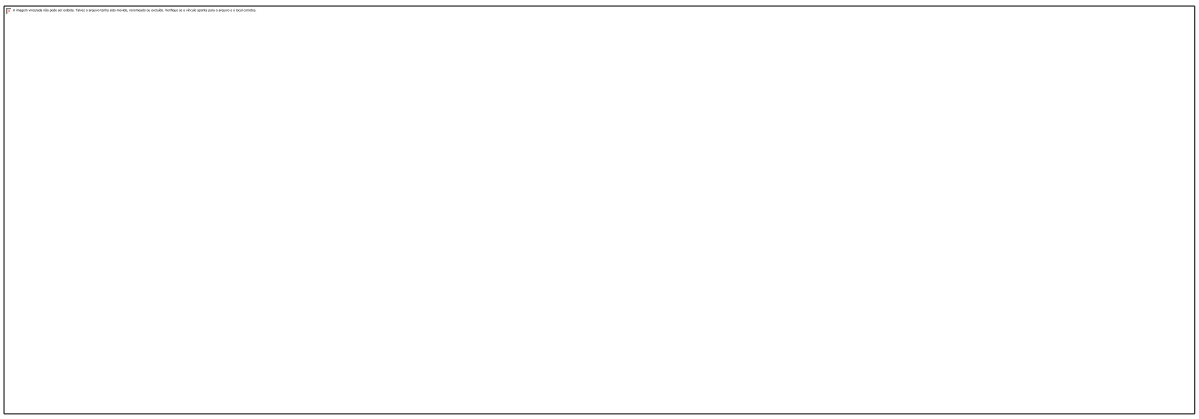


Figura 4: Distribuições de probabilidade de γ com diferentes conjuntos de dados aplicados ao modelo w0 wa CDM.

CÓDIGO: ET1303

AUTOR: SARA YASMIN TEIXEIRA DE JESUS

ORIENTADOR: MARY LUCIA DA SILVA NOGUEIRA

TÍTULO: A CONTRIBUIÇÃO DO RN NA EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE MINERAIS ESTRATÉGICOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA.

Resumo

Atualmente, a transição energética no Brasil vem sendo amplamente discutida, trazendo uma mudança global na questão das energias renováveis e a eficiência energética. No âmbito da pesquisa mineral, está em destaque no Brasil o Decreto n° 10.657, de 24 de março de 2021, instituindo o programa Pró-Minerais Estratégicos. Neste decreto, o art.2° faz o detalhamento de quais minerais compõem os Minerais Estratégicos, sendo eles divididos em três critérios, que são: dependência de importação para o suprimento de setores vitais, importância em aplicação de processos de alta tecnologia e minérios que são essenciais para economia e geração de superávit da balança comercial do país.

Sendo assim, o plano de trabalho visa investigar a contribuição do estado do Rio Grande do Norte na exploração e produção dos minerais estratégicos no Brasil. A metodologia utilizada no trabalho inclui a aquisição de conhecimento da região, levantamento e tratamento de dados e a produção de mapas e planilhas com os resultados obtidos. O projeto foi dividido em: levantamento dos dados minerários do estado pelo SIGMINE (Sistema de Informação Geográfica da Mineração), filtragem pelas fases minerárias e minerais estratégicos e a análise de todo o estado do RN por terra em mar. Essas atividades possuem grande importância para o conhecimento sobre os minerais estratégicos no estado e a sua contribuição para a transição energética no Brasil.

Palavras-chave: Minerais estratégicos, Transição energética, Pesquisa mineral.

TITLE: THE CONTRIBUTION OF RIO GRANDE DO NORTE TO THE EXPLORATION AND PRODUCTION OF STRATEGIC MINERALS FOR THE BRAZILIAN ENERGY TRANSITION.

Abstract

Currently, the energy transition in Brazil has been widely discussed, driving a global shift toward renewable energy and energy efficiency. Within the scope of mineral research, Federal Decree No. 10,657 of March 24, 2021, which instituted the Strategic Minerals Support Program (Pró-Minerais Estratégicos), has gained prominent attention in Brazil. In Article 2 of this decree, the strategic minerals are categorized into three criteria: import dependence for supplying vital sectors, key applications in high-technology processes, and essential minerals for the economy and the generation of the country's trade balance surplus.

Accordingly, this work plan aims to investigate the contribution of the state of Rio Grande do Norte to the exploration and production of strategic minerals in Brazil. The methodology includes acquiring regional geological knowledge, data collection and processing, and producing maps and spreadsheets detailing the obtained results. The project was divided into: collecting mineral data for the state using the Mining Geographic Information System (SIGMINE), filtering by mining phase and strategic mineral types, and analyzing the entire state of Rio Grande do Norte across both onshore and offshore areas. These activities are of major importance for advancing knowledge on strategic minerals in the state and their contribution to the energy transition in Brazil.

Keywords: Strategic minerals, Energy transition, Mineral research.

Introdução

Os minerais estratégicos possuem uma alta demanda atualmente, principalmente no contexto da transição energética e desenvolvimento tecnológico. De acordo com o art.2° do Decreto n° 10.657 os minerais estratégicos são divididos em três critérios, sendo eles: Critério I - Bens minerais do qual o País depende de importação em alto percentual para o suprimento de setores vitais da economia (enxofre, fosfato, potássio e molibdênio); Critério II - Bens minerais que tenha importância pela sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia (cobalto, cobre, estanho, grafita, platina, lítio, nióbio, níquel, silício, tálio, tântalo, terras raras, titânio, tungstênio, urânio e vanádio); Critério III - Bens minerais que detenha vantagens comparativas e que são essencial para a economia pela geração de superávit da balança comercial do País (alumínio, cobre, ferro, grafita, ouro, manganês, nióbio e urânio).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo analisar os processos minerários de minerais estratégicos no estado do Rio Grande do Norte, em terra e mar, nas fases de Exploração e Produção.

Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida seguindo os seguintes passos descritos pelo fluxograma da figura 1, na área de estudo apresentada pela figura 2.

Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos por meio do SIGMINE (Sistema de Informação Geográfica da Mineração), plataforma desenvolvida pela Agência Nacional de Mineração (ANM). As informações foram coletadas no dia 12 de janeiro de 2026, garantindo a utilização de uma base de dados atualizada para a análise dos processos minerários.

Os dados obtidos foram inseridos no software QGIS, por meio de camadas no formato shapefile. Em seguida, foram aplicados três filtros para o tratamento das informações, utilizando a ferramenta de expressões, baseado na tabela de atributos da camada. Inicialmente, foi realizada a delimitação da área de estudo, com foco no estado do Rio Grande do Norte (RN). Em seguida, os dados foram filtrados de acordo com as fases processuais da ANM, sendo divididos em: fases de exploração (Requerimento de Pesquisa e Autorização de Pesquisa) e fases de produção (Requerimento de Lavra, Direito de Requerer a Lavra e Concessão de lavra). Por fim, foi inserido o filtro com base nos minerais estratégicos, englobando os três critérios com minérios como fosfato, lítio, ferro e entre outros.

A junção desses filtros possibilitou uma análise mais completa da área de estudo, permitindo tanto o tratamento de dados na forma visual pela elaboração de mapas, quanto a produção dos quantitativos no formato de tabelas e gráficos.

Resultados e Discussões

A partir da análise dos dados adquiridos pelo SIGMINE, foi possível estudar os minerais estratégicos presentes no Rio Grande do Norte, no ambiente marinho e terrestre. A produção dos mapas foi feita levando em consideração as fases de exploração e produção mineral de acordo com o Código de Mineração Brasileiro Lei n° 227/1967, como mostra as figuras 3 e 4. Os resultados dos quantitativos de cada critério permitiram a análise por processos minerários, nos ambientes terrestre e marinho, conforme apresentado nas Tabelas 1, 2 e 3.

No Rio Grande do Norte, há um total de 1256 processos, no qual se destaca de forma significativa o minério de lítio, com um total de 323 processos no ambiente terrestre e 5 no ambiente marinho. Em seguida, outros minerais que se destacam são o minério de ferro, com 231 processos e o fosfato, com 173. Os quantitativos das substâncias que se repetem nos critérios II e III foram zerados na Tabela 3.

A partir da análise quantitativa desses dados, torna-se possível analisar a distribuição dos dados de acordo com as fases processuais da ANM (Requerimento de Pesquisa, Autorização de Pesquisa, Requerimento de Lavra, Direito de Requerer a Lavra e Concessão de lavra), como mostra a Tabela 4.

A análise das fases processuais apresenta um cenário exploratório no estado do Rio Grande do Norte, com predominância das fases de Autorização de Pesquisa (966) e Requerimento de Pesquisa (210), e com um potencial para a expansão das atividades minerárias no estado.

Além desses resultados, foi produzida uma tabela com os quantitativos por fases de todos os processos minerários no ambiente marinho do Rio Grande do Norte, sem filtros aplicados, como mostra a Tabela 5.

Conclusão

A partir das análises feitas pela pesquisa, foi possível concluir que o Rio Grande do Norte possui um forte cenário de pesquisa minerária, sendo um total de 908 processos de Autorização de Pesquisa no ambiente terrestre e 59 processos no ambiente marinho. Após a instauração do Decreto n° 10.657, em 2021, houve um aumento da busca pela pesquisa dos minerais estratégicos no estado, sendo antes do decreto um total de 523 processos na fase de Autorização de Pesquisa no ambiente terrestre, e apenas 12 processos no mar. Após o decreto, houve um aumento nos dados, sendo 566 processos no ambiente terrestre e 46 processos no ambiente marinho, sendo todos de Autorização de pesquisa.

Referências

BRASIL. Decreto n° 10.657, de 24 de março de 2021. Institui o Programa Pró-Minerais Estratégicos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2021.

Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Decreto/D10657.htm Acesso em: 12 jan. 2026

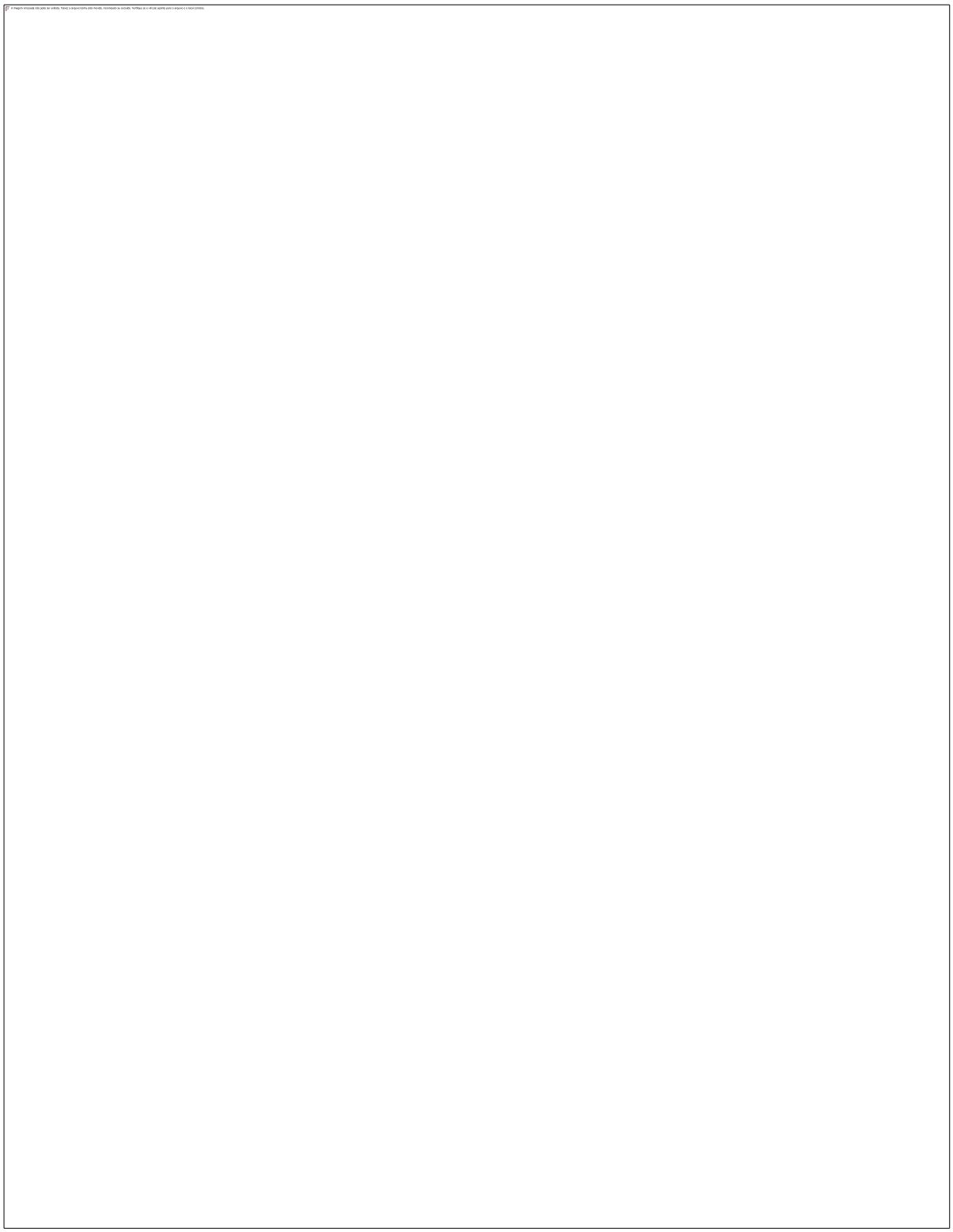
AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). ArcGIS Web Application – SIGMINE. Disponível em: https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908 Acesso em: 12 jan. 2026.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Versão 3.34. [S.l.]: QGIS Association, 2024. Disponível em:https://qgis.org. Acesso em: 12 jan. 2026.

Anexos



Tabelas 1, 2 e 3



Tabelas 3, 4 e 5

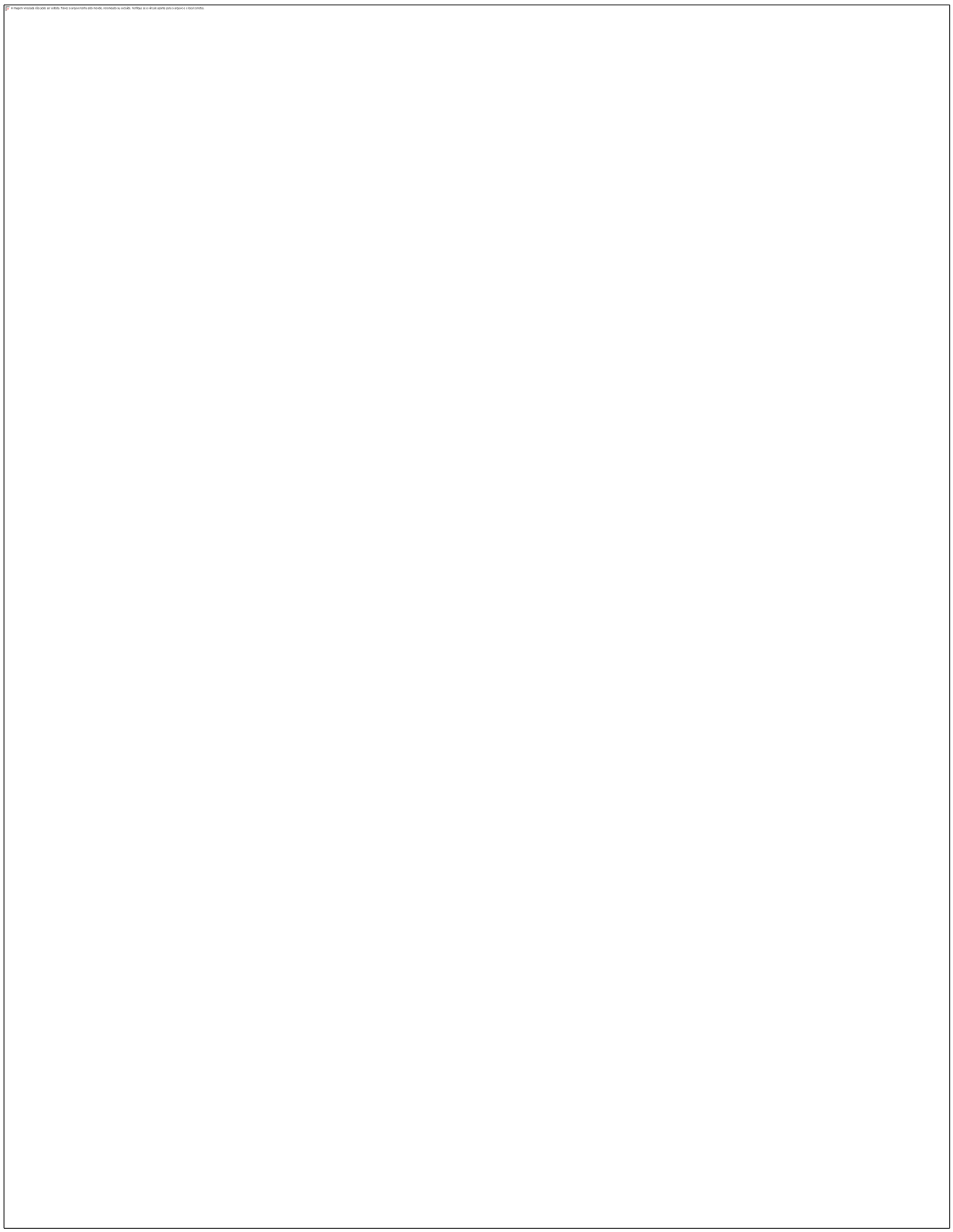


Tabela 5 e figura 1

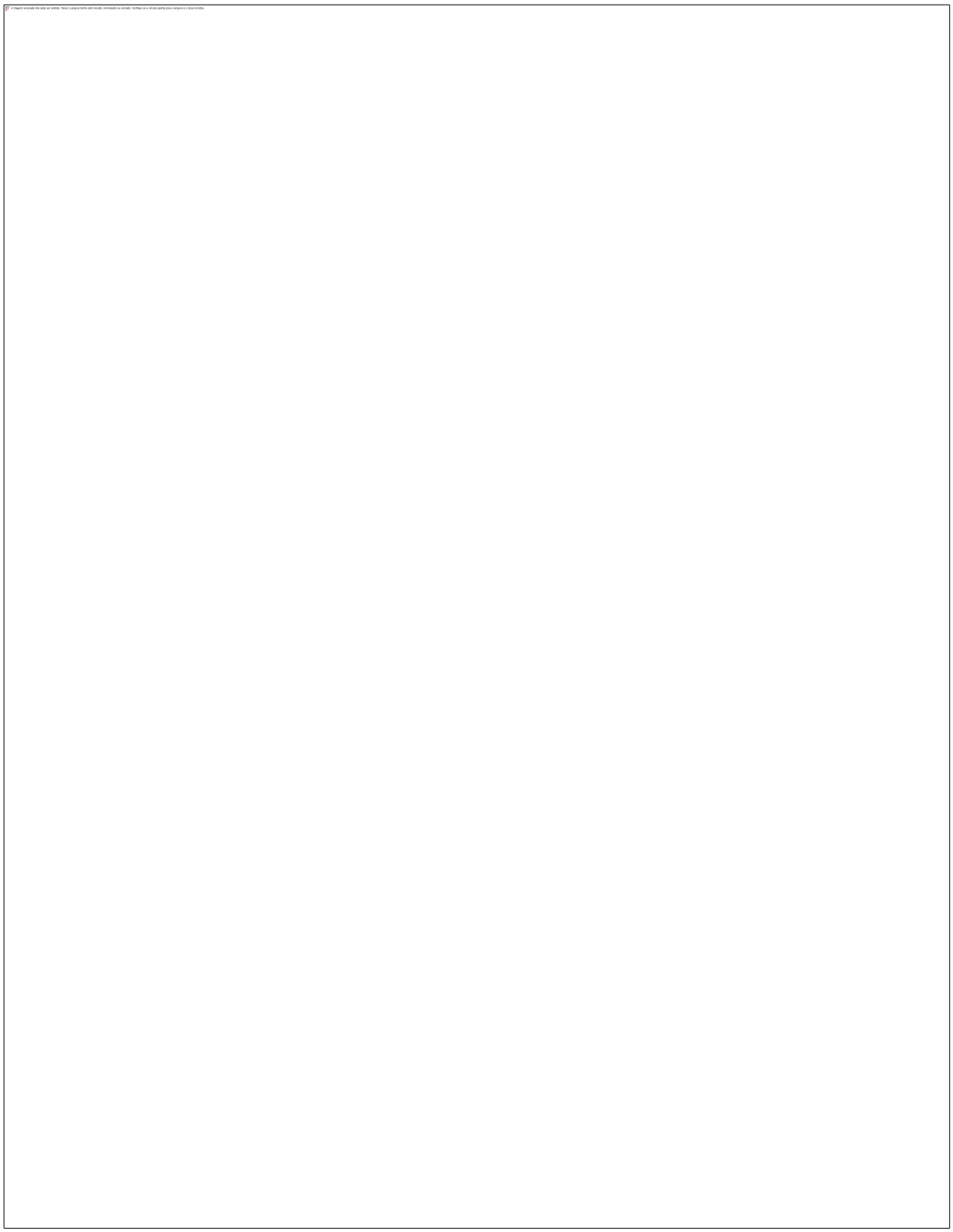


Figura 2

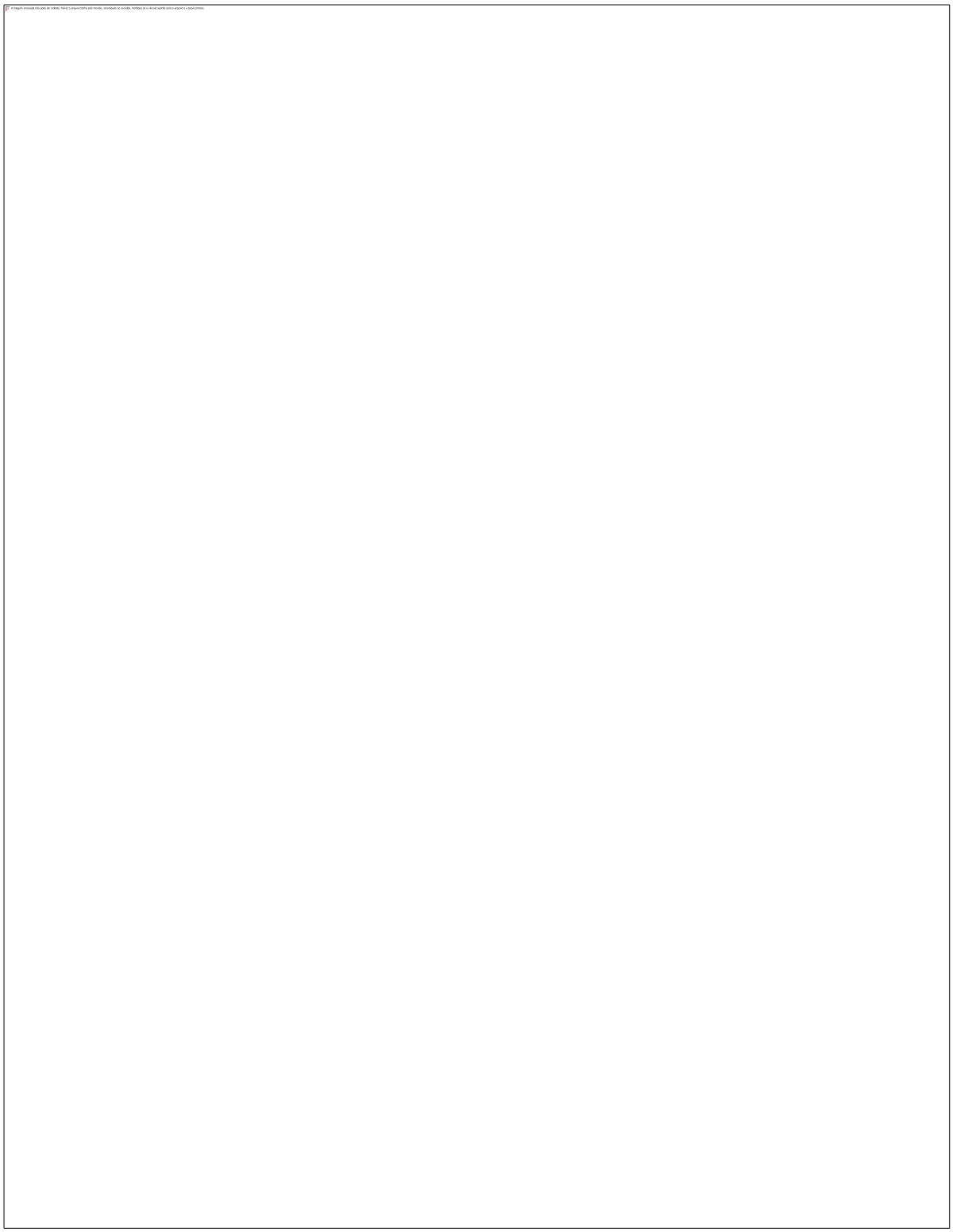


Figura 3



Figura 4

CÓDIGO: ET1306

AUTOR: ANNA BEATRIZ ALVES DANTAS

ORIENTADOR: MARY LUCIA DA SILVA NOGUEIRA

TÍTULO: Levantamento de Dados Geoespacial na plataforma continental de Areia Branca/RN

Resumo

Este trabalho apresenta o levantamento e a organização de dados geoespaciais relacionados à plataforma continental de Areia Branca, no Rio Grande do Norte. O principal objetivo foi agrupar informações que possam colaborar com a caracterização espacial da área de estudo. Para concluir o levantamento, foram necessárias consultas em diferentes fontes de dados, além da utilização de ferramentas de geoprocessamento para armazenamento, análise, tratamento e visualização dessas informações. A partir dos dados coletados, foram produzidas camadas geoespaciais, bem como a elaboração de mapa, dessa forma, permitindo uma melhor visualização e organização das informações disponíveis da área estudada. Portanto, o trabalho contribui para sistematização desses dados geoespaciais e também para a realização de uma base de informações que poderá auxiliar em futuros estudos.

Palavras-chave: Análise espacial; Geoprocessamento; Caracterização; Base de dados

TITLE: Geospatial Data Survey on the Areia Branca/RN Continental Shelf

Abstract

This study presents the compilation and organization of geospatial data regarding the Areia Branca continental shelf in Rio Grande do Norte. The primary objective was to consolidate information that could assist in the spatial characterization of the study area. Completing this survey required consulting various data sources and employing geoprocessing tools for the storage, analysis, processing, and visualization of the information. Based on the collected data, geospatial layers and a map were produced, thereby enabling improved visualization and organization of the available information on the study area. Consequently, this work contributes to the systematization of these geospatial data and establishes an information base that can support future studies.

Keywords: Spatial analysis; Geoprocessing; Characterization; Database;

Introdução

A importância dos dados geoespaciais vai além do simples mapeamento. Eles são ferramentas essenciais para a compreensão dos desafios que enfrentamos e para a formulação de soluções eficazes. Seu uso responsável e inovador pode transformar a nossa relação com o planeta, promovendo um futuro mais sustentável para todos os seus habitantes (CENTRO DE COMPETÊNCIAS GEOESPACIAL, 2025). Nesse sentido, o uso de dados geoespaciais, especialmente em estudos de áreas costeiras e marinhas, contribui para uma melhor compreensão, análise e representação do espaço geográfico estudado.

Por meio de geotecnologias, como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), é possível obter, organizar e analisar informações ambientais, geológicas, geomorfológicas e territoriais, permitindo uma melhor compreensão das relações existentes na área estudada.

Segundo informações reunidas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), por meio do Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, o município de Areia Branca está localizado no estado do Rio Grande do Norte, na mesorregião Oeste Potiguar e na microrregião de Mossoró. O município limita-se com Serra do Mel, Porto do Mangue, Grossos, Mossoró e com o Oceano Atlântico, abrangendo uma área de aproximadamente 373 km² (BELTRÃO et al., 2005).

Sendo assim, o uso de dados geoespaciais relacionados à área de estudo possibilita o levantamento, a organização e a representação de diferentes informações referentes ao município e à sua região costeira. A integração dessas informações permite a elaboração de mapas e contribui para uma análise mais precisa das características da área de estudo.

Portanto, este trabalho tem como objetivo realizar um levantamento de dados geoespaciais relacionados à plataforma continental de Areia Branca/RN, utilizando ferramentas de geoprocessamento para a coleta, organização, análise e representação cartográfica das informações obtidas.

Metodologia

Inicialmente, o desenvolvimento do trabalho foi planejado em oito etapas diferentes, como mostra o fluxo de atividades na figura 2. O planejamento contemplava desde o levantamento das informações existentes até a criação, teste e disponibilização de um banco de dados geoespacial. Entretanto, no decorrer do desenvolvimento das atividades, foram identificadas limitações relacionadas à infraestrutura e à disponibilidade de espaço no Laboratório de Soluções Ambientais (LASA), o que comprometeu a execução integral das etapas inicialmente planejadas.

Tendo em vista essas limitações, as atividades realizadas ficaram concentradas na coleta de dados, organização, armazenamento, análise destas informações, e por fim, a criação de produtos cartográficos, especialmente, o mapa de caracterização da área de estudo.

Dessa forma, as etapas relacionadas à estruturação, criação e alimentação do banco de dados não puderam ser executadas durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

Resultados e Discussões

Os dados utilizados no desenvolvimento do trabalho foram obtidos a partir de diferentes bases institucionais, incluindo plataformas de órgãos públicos e instituições responsáveis pela disponibilização de dados geoespaciais. Devido à diversidade de informações levantadas durante a pesquisa, os dados foram organizados e analisados de forma conjunta para a elaboração do produto cartográfico. Além do mais, durante a análise dos dados, verificou-se a utilização de diferentes sistemas de referência espacial.

A partir dos dados levantados, foi produzido um produto cartográfico utilizando o software ArcGIS 10.8, com o objetivo de representar espacialmente a área de estudo e organizar as principais informações geográficas disponíveis. A elaboração do mapa possibilitou visualizar a distribuição espacial dos dados e estabelecer uma representação integrada das informações coletadas.

Conforme apresentado na figura 4, o mapa permite visualizar a localização da área de estudo e sua relação com os demais elementos geográficos representados. A integração dessas informações possibilitou uma melhor compreensão dos elementos presentes na região de interesse, contribuindo para a caracterização espacial da plataforma continental de Areia Branca/RN.

Os dados levantados e o produto cartográfico elaborado constituem, portanto, uma base inicial para a continuidade do trabalho, possibilitando posteriormente a estruturação do banco de dados e a integração das informações em uma plataforma de consulta.

Conclusão

O levantamento realizado contribuiu para a junção de diferentes informações geoespaciais relacionadas à área de estudo, englobando aspectos geológicos, marítimos, ambientais, territoriais e de infraestrutura. A integração dessas informações permitiu uma representação mais ampla da região estudada e possibilitou a compreensão da distribuição espacial dos elementos levantados.

A produção do mapa demonstrou a importância da utilização de ferramentas de geoprocessamento para a organização e representação dos dados coletados. A utilização do ArcGIS possibilitou integrar diferentes camadas em um único produto cartográfico, facilitando a visualização e interpretação das informações relacionadas à plataforma continental de Areia Branca/RN.

Apesar das limitações encontradas, os objetivos relacionados ao levantamento e à organização inicial dos dados foram alcançados, resultando na elaboração de um produto cartográfico representativo da área de estudo. Os dados reunidos e organizados constituem uma base para a continuidade do trabalho, podendo posteriormente ser utilizados na estruturação de um banco de dados geoespacial e na ampliação das informações disponíveis sobre a região.

Referências

BELTRÃO, Breno Augusto et al. (Org.). Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, estado do Rio Grande do Norte: diagnóstico do município de Areia Branca. Recife: CPRM, 2005. Atlas Digital dos Recursos Hídricos Subterrâneos.

Centro de Competências para a Informação Geoespacial. A importância do uso de dados geoespaciais para a vida na Terra. CGEO, [s.d.]. Disponível em: https://cgeo.pt/artigos/a-importancia-do-uso-de-dados-geoespaciais-para-a-vida-na-terra. Acesso em: 28 ago. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE). Brasília, DF: ANM, 2026. Disponível em: Portal SIGMINE

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). GeoMaps: dados geográficos. Rio de Janeiro: ANP, [s.d.]. Disponível em: GeoMaps ANP Acesso em: 29 ago. 2026.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Mapas de projetos em licenciamento – Complexos Eólicos Offshore. Brasília, DF: IBAMA, 2026. Disponível em: IBAMA Acesso em: 29 ago. 2026.

MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Shape files dos Limites Marítimos. Rio de Janeiro: DHN, 2025. Disponível em: Marinha do Brasil – DHN Acesso em: 29 ago. 2026.

Anexos



Figura 1: Mapa de localização do município de Areia Branca/RN



Figura 2 : Fluxo metodológico

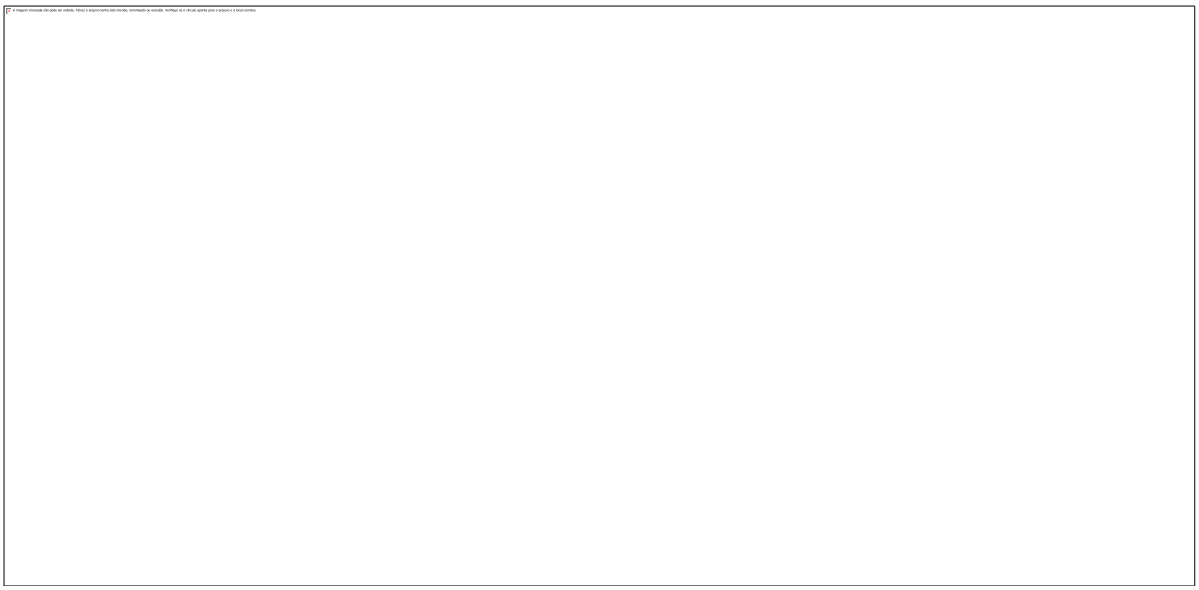


Figura 3: Tabela de organização e levantamento de dados geoespaciais

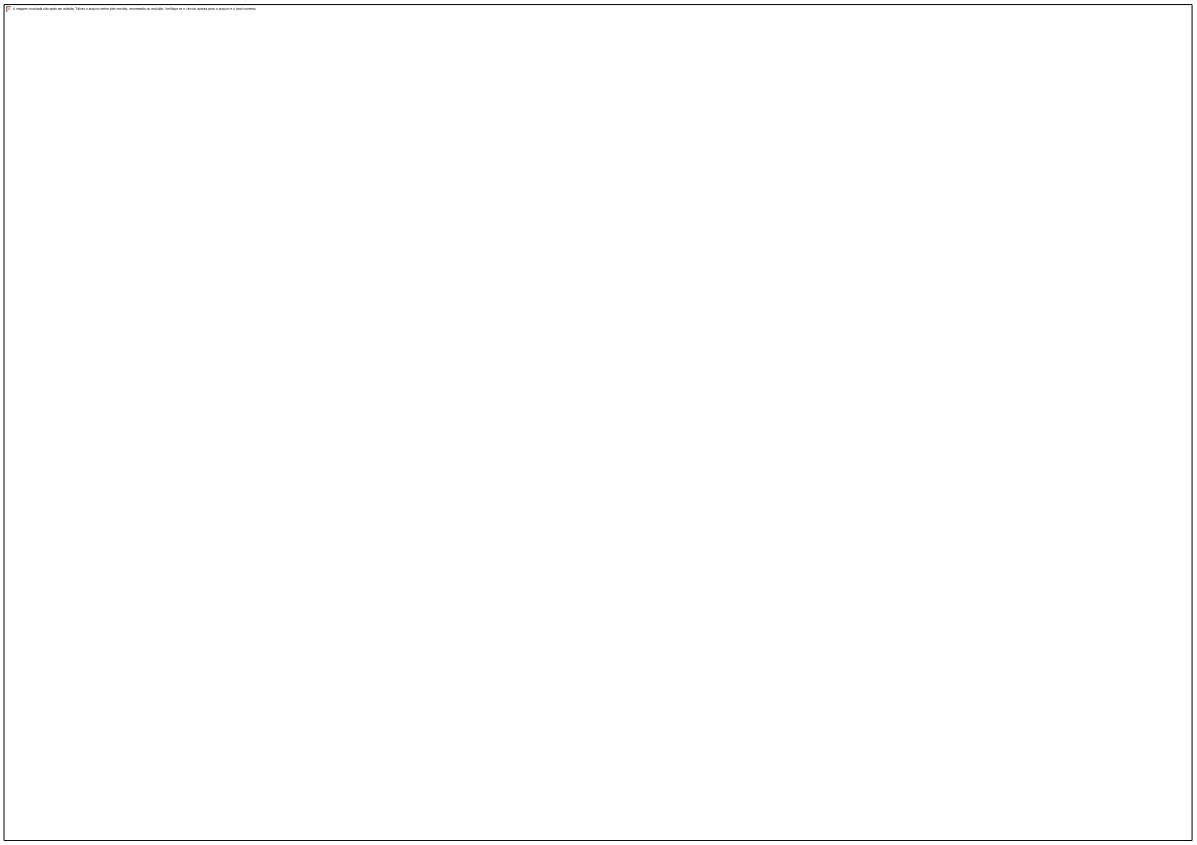
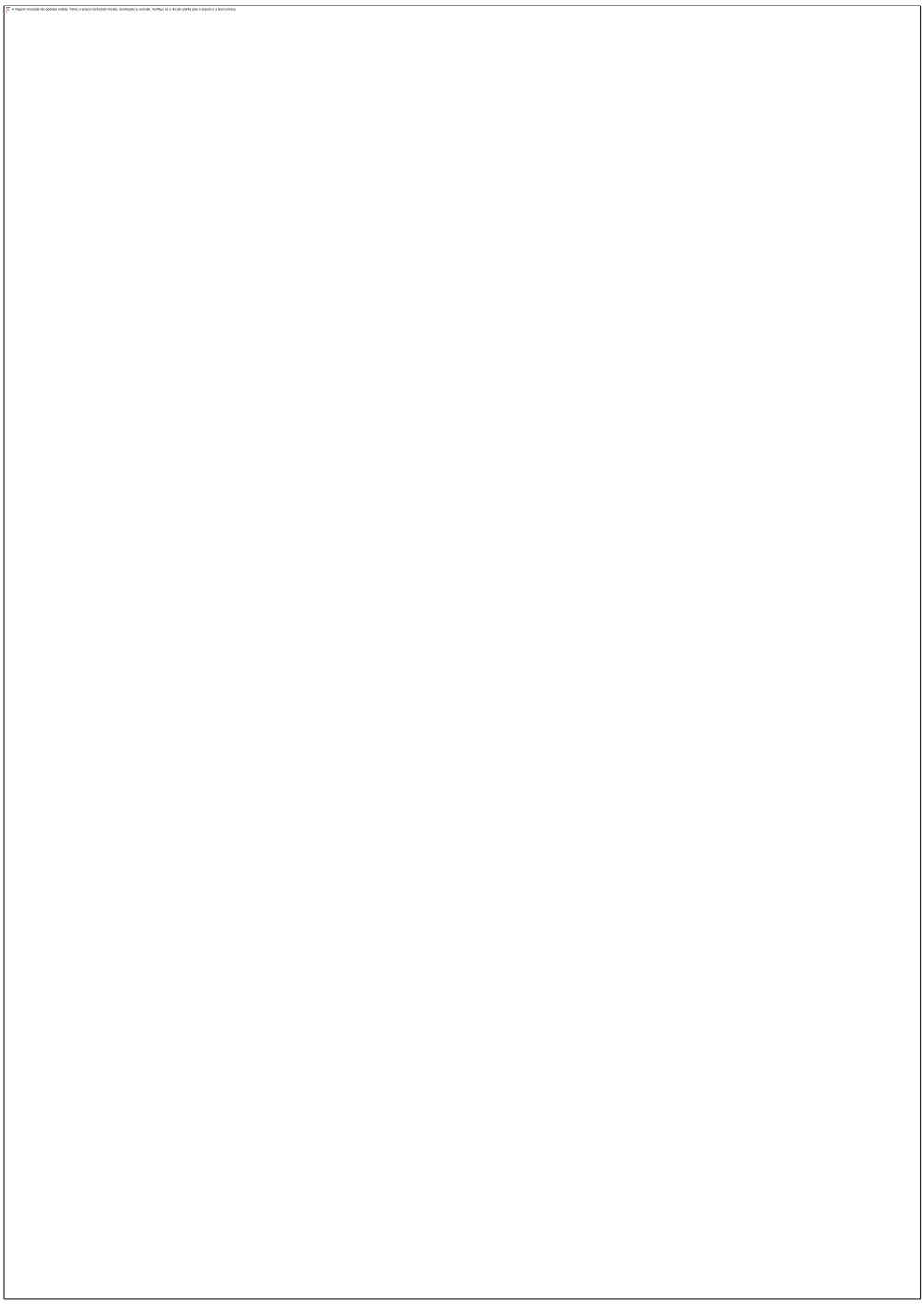
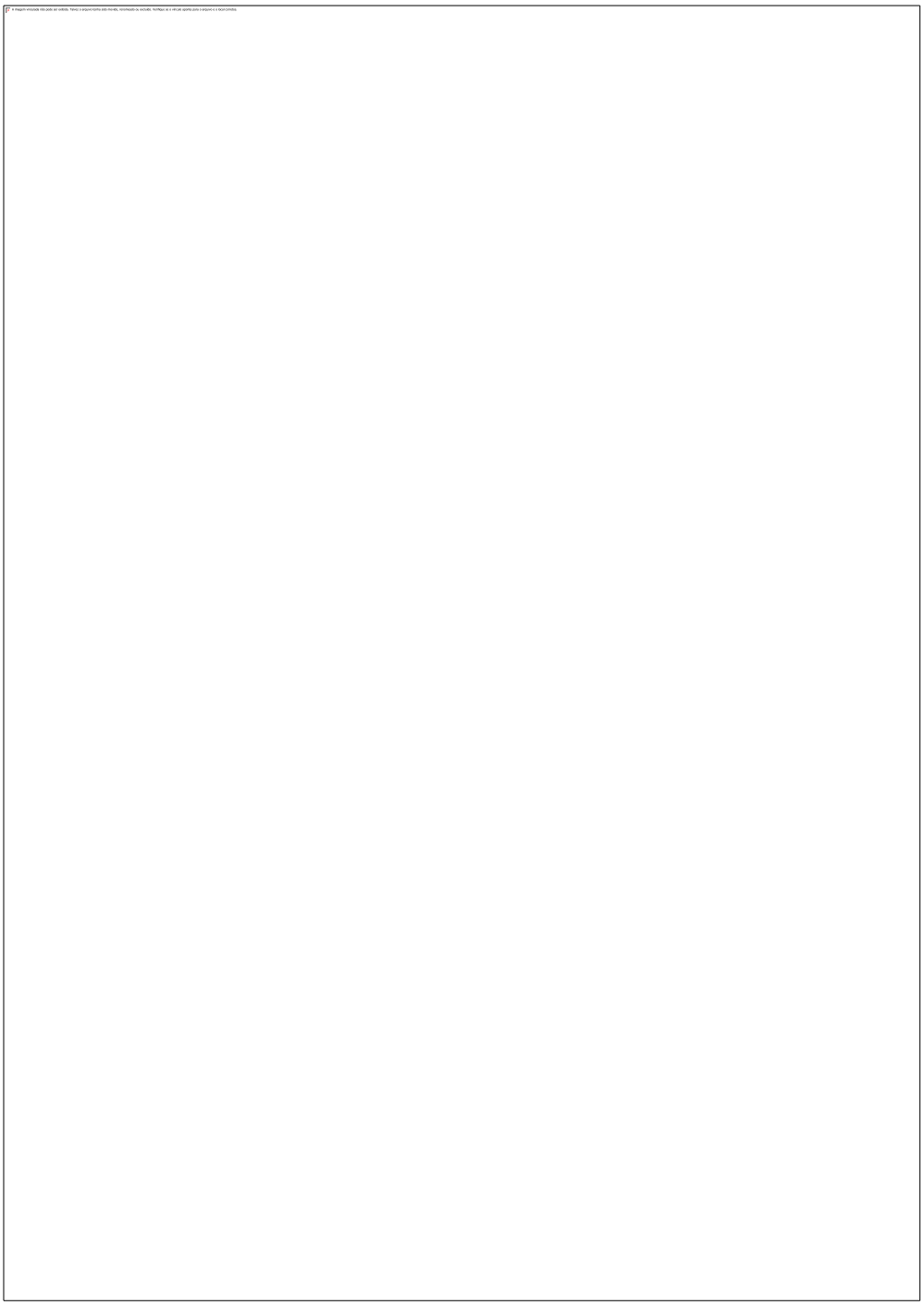


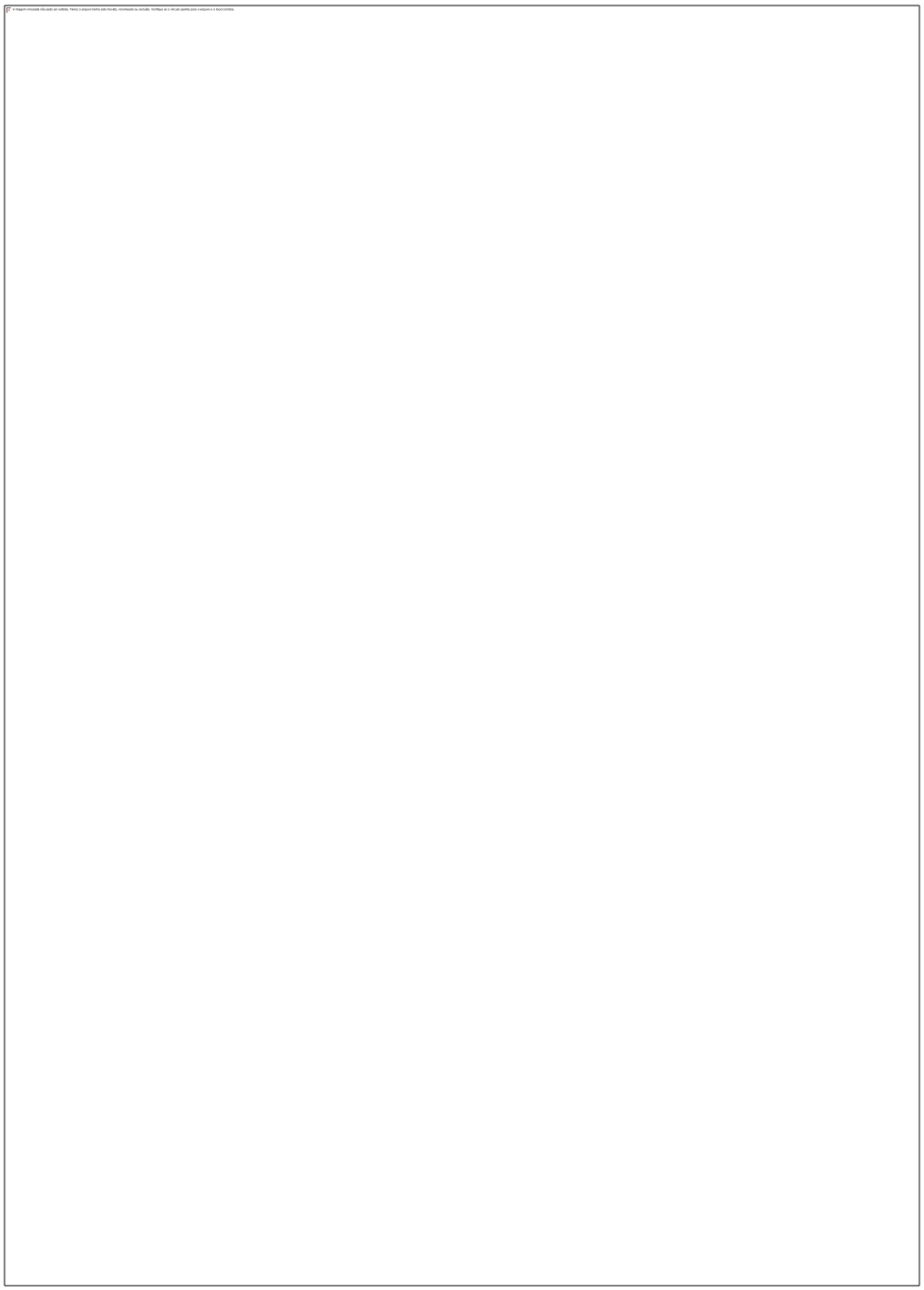
Figura 4: Mapa da área de estudo elaborado a partir dos dados geoespaciais levantados.



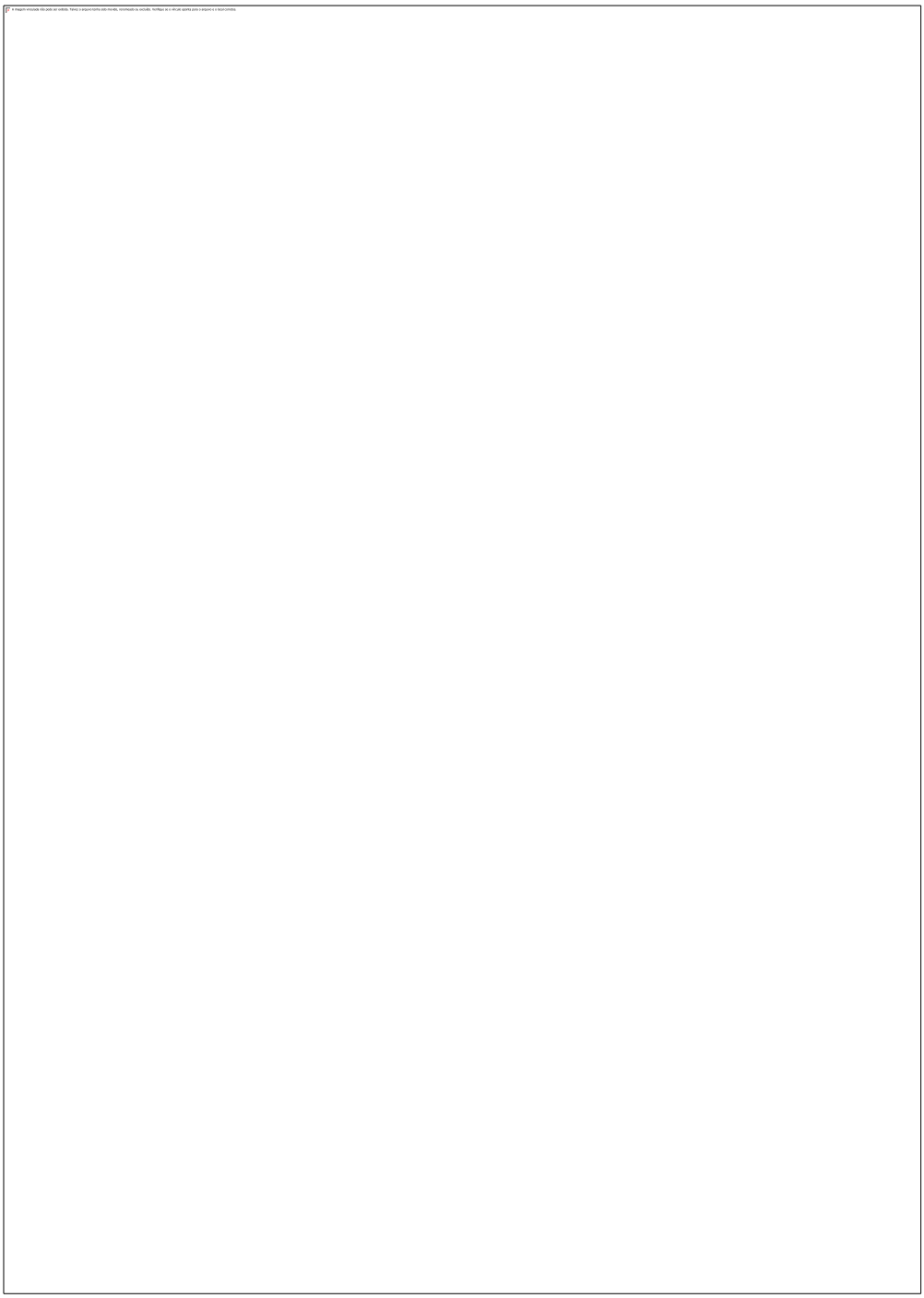
Capa



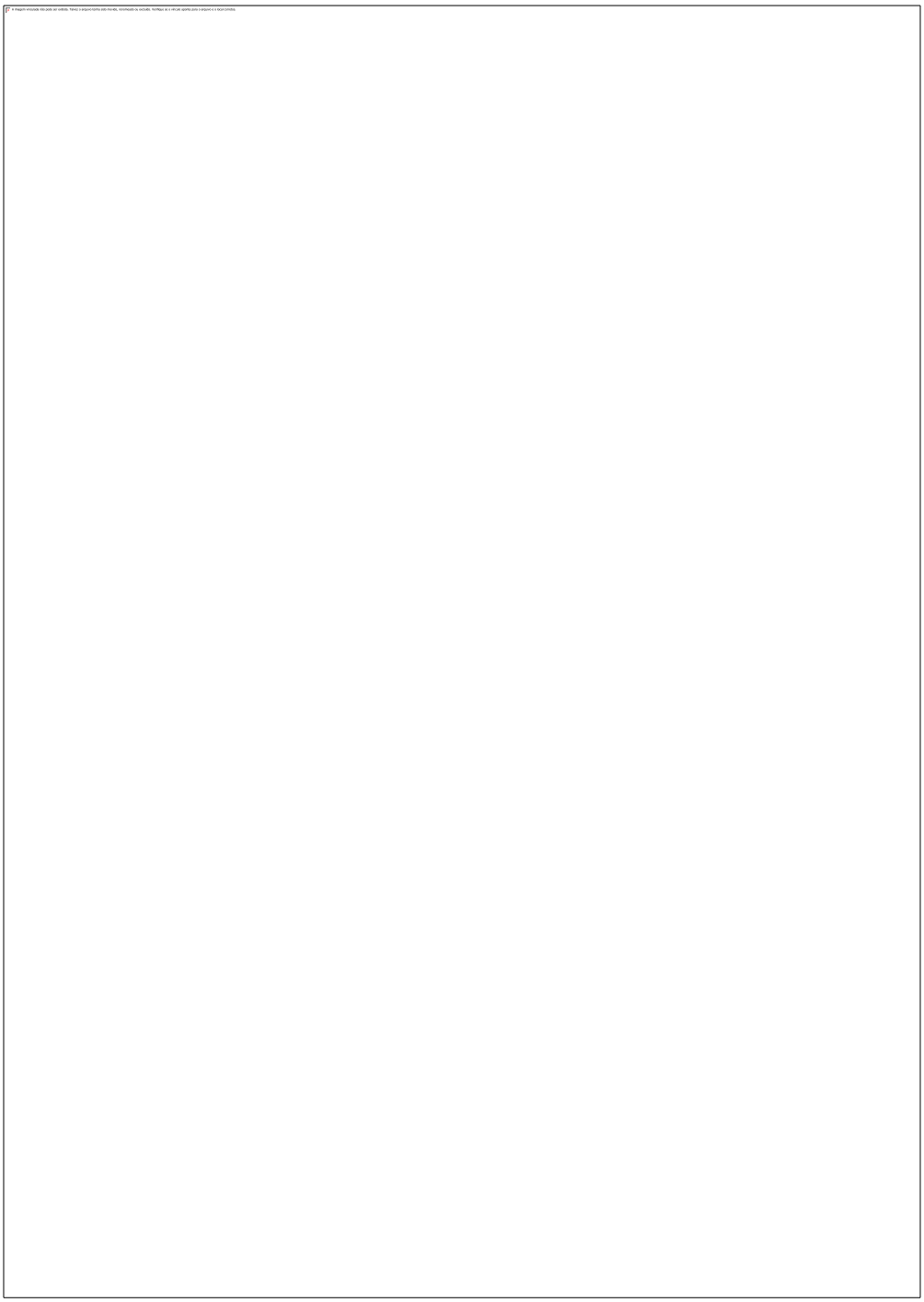
Sumário



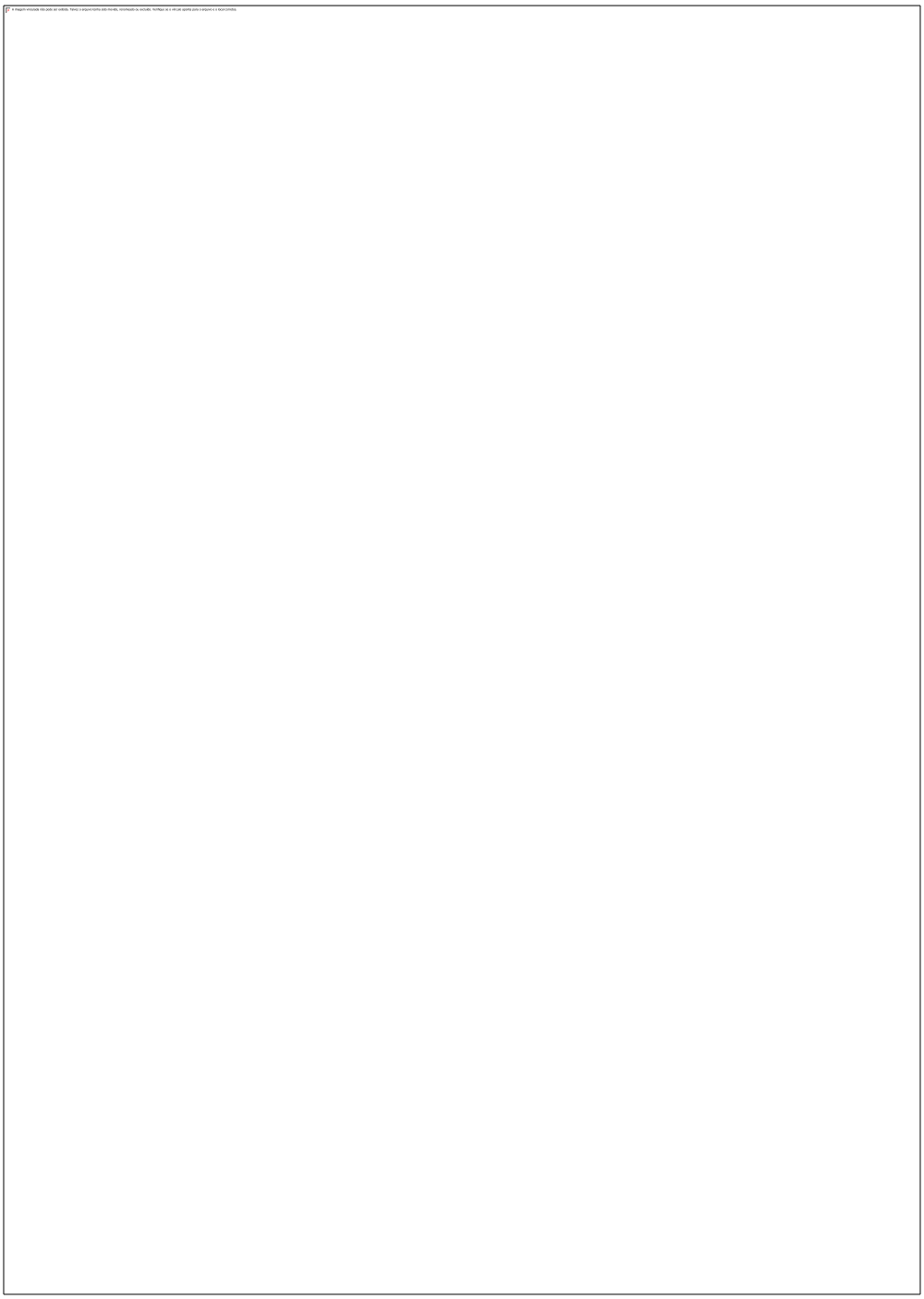
Resumo



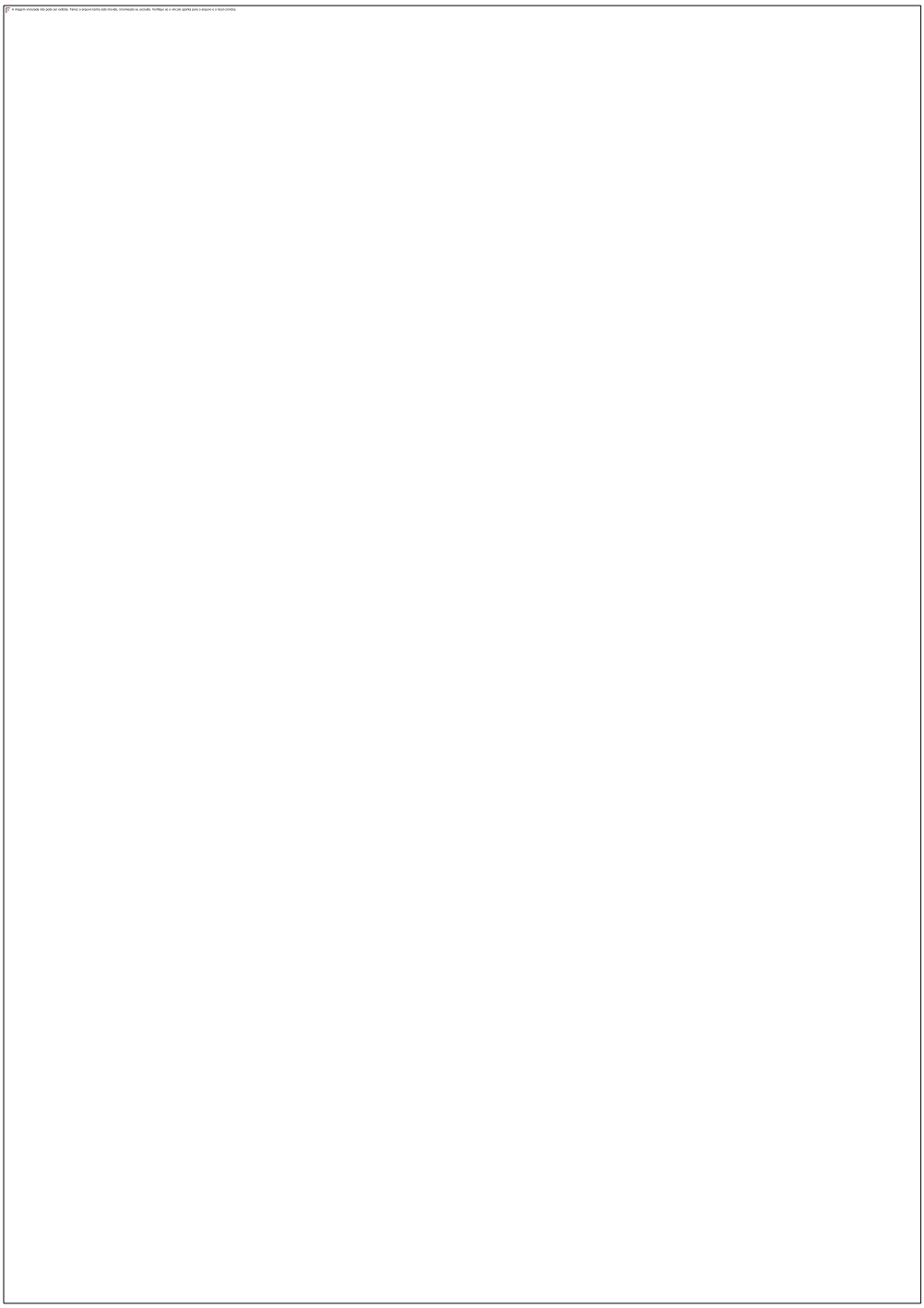
Introdução



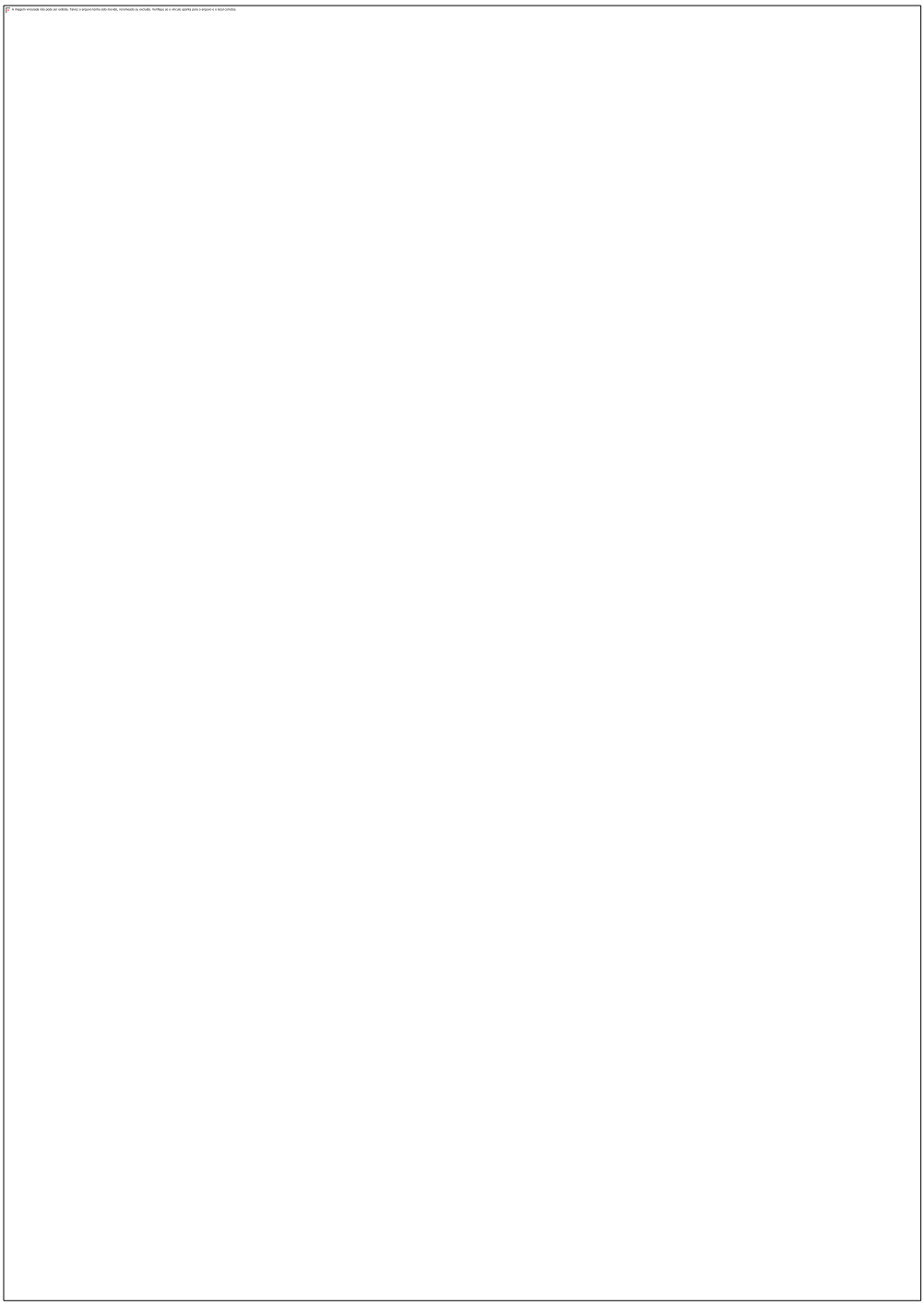
Introdução



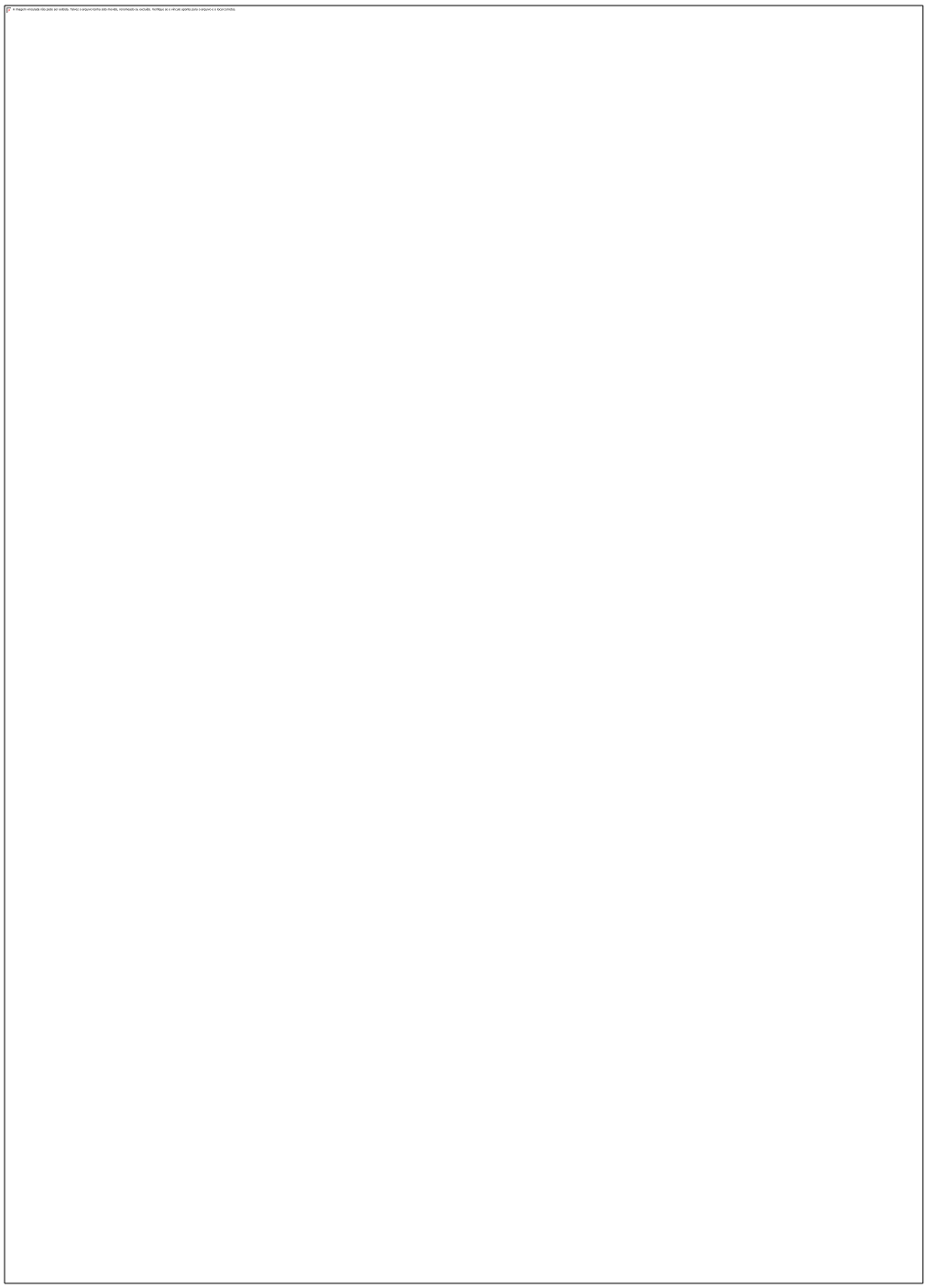
Metodologia



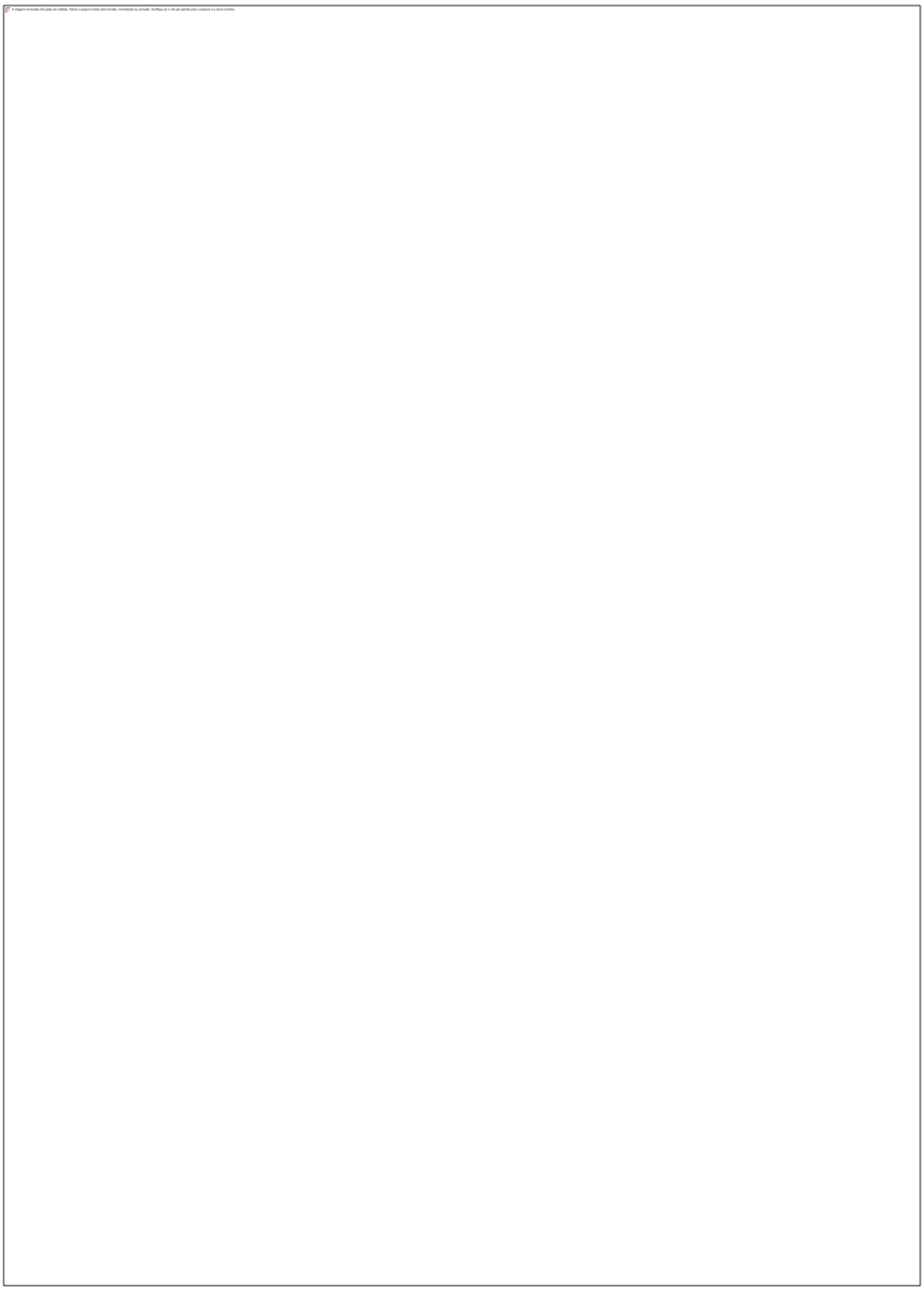
Resultados



Resultados



Conclusões



Referências

CÓDIGO: ET1338

AUTOR: BRUNA GABRIELA PEREIRA FREIRE

COAUTOR: EZEQUIEL AMADOR SOARES JUNIOR

COAUTOR: JOÃO VICTOR FERREIRA LACERDA AIRES

ORIENTADOR: LEONARDO ANDRADE DE ALMEIDA

TÍTULO: Análise da relação período-luminosidade das Cefeidas no infravermelho usando os dados do GAIA DR3 como calibradores

Resumo

As Cefeidas Clássicas são estrelas pulsantes fundamentais para a determinação de distâncias cósmicas e para a calibração de supernovas do tipo Ia. Este trabalho compara distâncias derivadas das paralaxes do Gaia DR3 com distâncias baseadas na relação período-luminosidade (P–L) no infravermelho médio, obtidas a partir de dados WISE e Spitzer. De uma amostra inicial de 1.589 Cefeidas, foram selecionadas 245 estrelas que apresentam o modo fundamental, com paralaxes positivas, razão sinal-ruído superior a 5 e erro relativo inferior a 5%. Destas, 160 têm abundância de ferro medida via espectroscopia. Na subamostra com metalicidade, o ajuste MCMC do modelo-base resultou em m = 1,0680 (+0,0073/−0,0073) e b = 0,0046 (+0,0082/−0,0084) kpc. O coeficiente angular superior à unidade evidencia uma discrepância sistemática entre as escalas de distância. Motivados por esse resultado, testaram-se modelos com termos de metalicidade para descrever empiricamente esse desvio. Os modelos foram comparados por máxima verossimilhança e pelo Critério de Informação Bayesiano (BIC). O modelo em que a correção de metalicidade na magnitude absoluta varia com o período de pulsação apresentou o menor BIC, com ΔBIC = 17,17 em relação ao modelo-base. Assim, a inclusão da metalicidade na estimativa da distância P–L melhora empiricamente a descrição da discrepância observada, embora não estabeleça uma causa única nem substitua uma recalibração completa da relação P–L.

Palavras-chave: Cefeidas. Distâncias astrofísicas. Relação período-luminosidade. Gaia.

TITLE: Comparing Cepheid Distances: Gaia DR3, Mid-Infrared and Metallicity

Abstract

Classical Cepheids are pulsating stars that are fundamental for determining cosmic distances and calibrating Type Ia supernovae. This work compares distances derived

from Gaia DR3 parallaxes with distances based on the mid-infrared Period–Luminosity (P–L) relation obtained from WISE and Spitzer data. From an initial sample of 1,589 Cepheids, 245 fundamental-mode stars with positive parallaxes, signal-to-noise ratios above 5, and relative parallax uncertainties below 5% were selected. Of these, 160 objects were matched with spectroscopic iron abundances. For this metallicity subsample, a Markov Chain Monte Carlo fit of the relation between Gaia and P–L distances yielded m = 1.0680 (+0.0073/−0.0073) and b = 0.0046 (+0.0082/−0.0084) kpc. The slope greater than one indicates a systematic discrepancy between the two distance scales. Motivated by this result, models including metallicity terms were tested to empirically describe this discrepancy. The models were compared through maximum likelihood and the Bayesian Information Criterion (BIC). The model allowing the metallicity correction to the P–L absolute magnitude to vary with pulsation period, using 10 days as a fixed reference period, achieved the lowest BIC, with ΔBIC = 17.17 relative to the baseline model. Metallicity therefore empirically improves the description of the observed discrepancy, although it neither establishes a unique cause nor replaces a complete recalibration of the P–L relation.

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 (H0), 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 estudo, examinamos a concordância entre as distâncias de Cefeidas estimadas pela relação P–L no infravermelho médio, compiladas por Skowron et al. (2019) [7], e as distâncias derivadas das paralaxes do Gaia DR3 [6]. Após caracterizar o desvio entre essas escalas, avaliamos a metalicidade como variável adicional, utilizando abundâncias espectroscópicas de ferro disponibilizadas por Luck (2018) [9]. O objetivo não é recalibrar diretamente a relação P–L a partir da fotometria bruta, mas verificar se termos dependentes de [Fe/H] descrevem melhor o viés entre as distâncias P–L no infravermelho e as distâncias Gaia.

Metodologia

A metodologia baseia-se em uma análise comparativa e estatística de distâncias de Cefeidas Clássicas, confrontando distâncias derivadas de paralaxes Gaia DR3 com distâncias baseadas na relação período-luminosidade (P–L) no infravermelho médio, compiladas por Skowron et al. (2019) [7]. A nossa análise utiliza também as abundâncias de ferro obtidas por espectroscopia e disponibilizadas por Luck (2018) [9].

O processo de seleção da amostra começou com 1.589 Cefeidas. Foram mantidas estrelas em modo fundamental e realizou-se o cruzamento posicional com Gaia DR3 usando raio máximo de 1 segundo de arco. Aplicaram-se os seguintes critérios de qualidade: (1) foram selecionadas estrelas com razão sinal-ruído de paralaxe superior a 5 no Gaia DR3. (2) a amostra foi restrita à Cefeidas no modo fundamental. (3) foram mantidas apenas estrelas com erro relativo da paralaxe inferior a 5%.

A Figura 1 apresenta visualmente as etapas de seleção da amostra. Os pontos cinza correspondem às 1.589 Cefeidas iniciais; os pontos azuis representam as 245 estrelas remanescentes após a aplicação dos critérios de qualidade astrométrica e a remoção de outliers; e os pontos laranja identificam a subamostra final de 160 Cefeidas com abundâncias espectroscópicas de ferro disponíveis.

Figura 1 – Erro relativo de paralaxe em função da distância Gaia nas etapas de seleção da amostra: amostra inicial (N = 1.589), após filtros Gaia e remoção de outliers (N = 245) e subamostra final com metalicidade disponível (N = 160). Os eixos estão em escala logarítmica.

FONTE: Autor (2026).

Com a qualidade astrométrica estabelecida, cada objeto da subamostra final de 160 Cefeidas é descrito por duas estimativas independentes de distância: uma baseada na paralaxe medida pelo Gaia DR3 e outra fornecida pela relação período–luminosidade no infravermelho médio. A comparação entre essas escalas constitui a base dos ajustes realizados neste trabalho.

(i) A distância Gaia é obtida diretamente pela inversão da paralaxe π. Em parsecs, ela é dada por:

dGaia (pc) = 1000 / π(mas), (1)

A incerteza associada à distância Gaia é propagada a partir da incerteza da paralaxe.

(ii) A segunda estimativa corresponde à distância P–L original, aqui indicada por dP–L,orig, reportada no catálogo de Skowron et al. (2019) [7] e derivada de fotometria infravermelha dos satélites WISE e Spitzer. Em termos gerais, essa distância de catálogo pode ser escrita como:

dP–L,orig (pc) = 10^(0,2(mλ − Mλ − Aλ) + 1), (2)

nessa expressão, mλ representa a magnitude aparente, Mλ a magnitude absoluta prevista pela relação P–L e Aλ a extinção na banda considerada. Portanto, dP–L,orig designa especificamente a distância original publicada por Skowron et al. (2019), adotada neste estudo juntamente com sua incerteza.

As abundâncias químicas foram obtidas pelo cruzamento da subamostra com o catálogo espectroscópico de Luck (2018) [9]. Para cada Cefeida, foi utilizada a coluna Feavg, que fornece a abundância média de ferro. Para expressar esses valores na escala relativa adotada nesta análise, tomou-se logε⊙(Fe) = 7,50 e calculou-se [Fe/H] = Feavg − 7,50.

Inicialmente, estabeleceu-se uma referência sem metalicidade para a subamostra de 160 Cefeidas. A relação entre a distância Gaia e a distância P–L original foi ajustada por MCMC, considerando as incertezas em ambas as escalas: dGaia = m dP–L,orig + b. Esse ajuste descreve a discrepância inicial entre as duas estimativas de distância antes de introduzir qualquer correção química.

A extensão com metalicidade foi aplicada à estimativa de distância P–L. O procedimento foi organizado nas etapas a seguir.

Etapa 1 — Distância de partida. Denotou-se por dP–L,orig a distância original fornecida

pelo catálogo de Skowron et al. (2019), calculada a partir da fotometria WISE e Spitzer e da relação período–luminosidade. Essa é a distância que entra como ponto de partida em todos os modelos; sua incerteza também é mantida.

Etapa 2 — Correção na magnitude absoluta. Em vez de somar um termo diretamente à distância Gaia, a metalicidade modifica o termo de magnitude absoluta da relação

P–L: $M_{\lambda,corr} = M_{\lambda} + \Delta M$. (3)

A correção ΔM é, portanto, o ingrediente novo introduzido no cálculo da distância P–L.

Etapa 3 — Distância P–L corrigida. Como a distância depende exponencialmente do módulo de distância, a alteração em magnitude é convertida em um fator multiplicativo aplicado à distância original:

$d_{P-L,corr} = d_{P-L,orig} \times 10^{(-0,2\Delta M)}$. (4)

Assim, $d_{P-L,corr}$ é a própria $d_{P-L,orig}$ corrigida pelo fator determinado pela metalicidade e, introduzido de duas formas: modelos M1 e M2, detalhados a seguir.

Etapa 4 — Formulações comparadas. Foram avaliados três modelos para a correção na magnitude absoluta que entra no cálculo da distância P–L.

No modelo M0, não há correção: $\Delta M = 0$ e $d_{P-L,corr} = d_{P-L,orig}$;

No modelo M1, a correção depende apenas da metalicidade: $\Delta M = c[Fe/H]$;

No modelo M2, permite-se adicionalmente que esse efeito varie com o período de pulsação: $\Delta M = c[Fe/H] + q(\log_{10}(P) - 1)[Fe/H]$, com P expresso em dias. O termo $\log_{10}(P) - 1$ adota 10 dias como período-pivô fixo; portanto, em M2, c representa o efeito da metalicidade para uma Cefeida de 10 dias, enquanto q quantifica a variação desse efeito com o logaritmo do período.

Etapa 5 — Ajuste, incertezas e seleção. Cada versão corrigida da distância P–L foi comparada a distância Gaia pela mesma relação linear, $d_{Gaia} = m\, d_{P-L,corr} + b$. As incertezas observacionais em d_{Gaia} e $d_{P-L,corr}$ foram propagadas na verossimilhança. Para cada modelo, a distribuição posterior de m, b, c e q foi amostrada por MCMC com 40 caminhantes, 20.000 passos e descarte inicial de 5.000 passos. Os intervalos reportados correspondem aos percentis 16, 50 e 84% das cadeias posteriores. O BIC foi calculado separadamente no máximo da verossimilhança e usado para selecionar os modelos [10].

Resultados e Discussões

A comparação entre as distâncias Gaia DR3 e as distâncias P–L de Skowron et al. (2019) constitui o núcleo deste trabalho. Todas as análises quantitativas apresentadas a seguir utilizam exclusivamente a subamostra de 160 Cefeidas para as quais estão disponíveis, de forma simultânea, distâncias Gaia, distâncias P–L no infravermelho médio e abundâncias espectroscópicas de ferro. Essa escolha mantém fixo o conjunto de

estrelas em todas as etapas e permite atribuir eventuais mudanças de desempenho à modelagem, e não à composição da amostra.

A Figura 2 apresenta a comparação direta entre as distâncias Gaia e as distâncias P–L originais de catálogo, dP–L,orig, para as 160 Cefeidas. A linha de identidade (reta azul tracejada) representa a concordância perfeita entre as duas estimativas. Embora os dados exibam forte correlação, os afastamentos em relação a essa referência indicam que a relação dGaia = dP–L,orig não descreve integralmente a subamostra. Esse diagnóstico visual motiva o ajuste estatístico da relação entre as escalas.

Figura 2 – Ajuste linear das distâncias Gaia e P–L originais de catálogo para as 160 Cefeidas com metalicidade. As linhas azul e vermelha representam, respectivamente, a identidade e o ajuste linear.

FONTE: Autor (2026).

A Figura 3 mostra as distribuições a posteriori dos parâmetros do modelo M0 ajustado por MCMC à subamostra de 160 Cefeidas. O ajuste resultou em m = 1,0680 (+0,0073/−0,0073) e b = 0,0046 (+0,0082/−0,0084) kpc. O intervalo do coeficiente angular permanece inteiramente acima de um, enquanto o intercepto é compatível com zero. Assim, o desvio inicial entre Gaia e a distância P–L original é predominantemente proporcional à distância, e não um deslocamento constante.

Figura 3 – Distribuições de probabilidade à posteriori para o coeficiente angular m e o intercepto b do ajuste linear MCMC na subamostra de 160 Cefeidas.

FONTE: Autor (2026).

A discrepância inicial motiva investigar se a composição química contribui para a construção da distância P–L. Assim, ajustamos usando o mesmo procedimento os modelos M1 e M2 apresentados na Metodologia. Os resultados dos três ajustes são apresentados na Figura 4. Nesta figura, os pontos semitransparentes mostram, para cada formulação, as distâncias P–L corrigidas obtidas a partir de dP–L,orig. As retas de M0 e M1 praticamente se sobrepõem porque seus coeficientes m e b ajustados são muito próximos; M2 também se afasta apenas discretamente na escala global.

A comparação estatística entre os 3 modelos foi realizada pelo Critério de Informação Bayesiano, $BIC = k \ln(N) - 2 \ln(\hat{L})$, que combina a qualidade do ajuste (verossimilhança máxima $\hat{L}$) com uma penalização pelo número de parâmetros livres k.

Valores menores de BIC são preferidos. Como orientação, diferenças ΔBIC superiores a 6 correspondem a evidência forte contra o modelo de maior BIC.

Os resultados numéricos estão reunidos na Tabela 1. O modelo M2, no qual a correção de metalicidade pode variar com o período em torno do pivô de 10 dias, apresentou o menor BIC (−19,26), seguido por M1 (−13,84) e M0 (−2,09). Em relação a M2, obtém-se ΔBIC = 17,17 para M0 e ΔBIC = 5,42 para M1. Portanto, o M2 fornece o melhor compromisso entre qualidade do ajuste e complexidade penalizada pelo BIC. A preferência por M2 é muito clara em relação ao modelo sem metalicidade; frente a M1, ela é favorecida, embora a diferença permaneça abaixo do limiar conservador ΔBIC = 6 para evidência forte.

As incertezas dos coeficientes foram obtidas via MCMC para os três modelos, utilizando a mesma verossimilhança empregada na comparação. Após o descarte inicial, cada cadeia forneceu 600.000 amostras posteriores. A Tabela 1 apresenta a mediana e o intervalo de confiança 68% (percentis 16–84%), dos parâmetros livres dos três modelos.

Tabela 1 – Coeficientes dos modelos com correção de metalicidade aplicada à estimativa de distância P–L original (N = 160). Os valores são medianas posteriores MCMC, seguidas pelos intervalos centrais de 68% (+1σ/−1σ), veja em anexo.

FONTE: Autor (2026).

Figura 4 – Comparação, na faixa central da amostra, entre a identidade e as retas ajustadas por M0, M1 e M2 após a correção da distância P–L original (N = 160).

FONTE: Autor (2026).

Os resultados exigem cautela interpretativa. A preferência por M2 não demonstra que a metalicidade seja a única causa da discrepância entre as distâncias Gaia e a relação P–L, podendo estar também relacionado com extinção residual, posição no disco galáctico e efeitos de seleção da amostra.

Como próximos passos, recomenda-se aumentar a amostra de Cefeidas com metalicidade [Fe/H] e ajustar um modelo hierárquico que incorpore conjuntamente fotometria, extinção, paralaxes Gaia e estrutura galáctica. Essa abordagem permitiria testar uma recalibração física mais completa da relação P–L.

Conclusão

Este trabalho avaliou a consistência entre distâncias de Cefeidas Clássicas obtidas por paralaxes Gaia DR3 e por relações período–luminosidade no infravermelho médio baseadas em dados WISE e Spitzer. A análise quantitativa foi conduzida exclusivamente com 160 Cefeidas que possuem também abundâncias espectroscópicas de ferro.

O ajuste linear por MCMC da relação não corrigida entre dGaia e a distância P–L original, dP–L,orig, evidenciou discrepância sistemática entre as escalas, com m = 1,0680 (+0,0073/−0,0073) e b = 0,0046 (+0,0082/−0,0084) kpc. O coeficiente angular acima da unidade indica que o desvio é predominantemente proporcional à distância, enquanto o intercepto permanece compatível com zero.

A metalicidade foi então incorporada à estimativa P–L por meio de uma correção na magnitude absoluta prevista. Essa correção multiplica a distância original dP–L,orig e produz dP–L,corr antes da comparação com Gaia. Os três modelos foram ajustados por MCMC na mesma subamostra. Entre eles, M2, no qual a correção de metalicidade na magnitude absoluta varia com o período de pulsação em torno do pivô fixo de 10 dias, apresentou o menor BIC (−19,26). As diferenças ΔBIC = 17,17 em relação a M0 e ΔBIC = 5,42 em relação a M1 indicam que M2 fornece o melhor compromisso entre ajuste e complexidade dentro desta subamostra.

O resultado não constitui uma recalibração completa da relação P–L nem identifica uma causa única para o desvio observado. Extinção residual, distribuição espacial, incertezas sistemáticas e seleção amostral também podem contribuir. Ainda assim, a análise mostra que inserir a metalicidade no termo que modifica a distância P–L original melhora empiricamente a concordância com as distâncias obtidas pelo Gaia e oferece uma rota fisicamente mais apropriada para refinamentos futuros.

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. 2026.

[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. 2026.

[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. 2026.

[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. 2026.

[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. 2026.

[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. 2026.

[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. 2026.

[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. 2026.

[9] LUCK, R. E. Cepheid Abundances: Multiphase Results and Spatial Gradients. The Astronomical Journal, v. 156, n. 171, 2018. DOI: 10.3847/1538-3881/aadcac. Catálogo VizieR: J/AJ/156/171.

[10] SCHWARZ, Gideon. Estimating the Dimension of a Model. The Annals of Statistics, v. 6, n. 2, p. 461-464, 1978. DOI: 10.1214/aos/1176344136.

Anexos

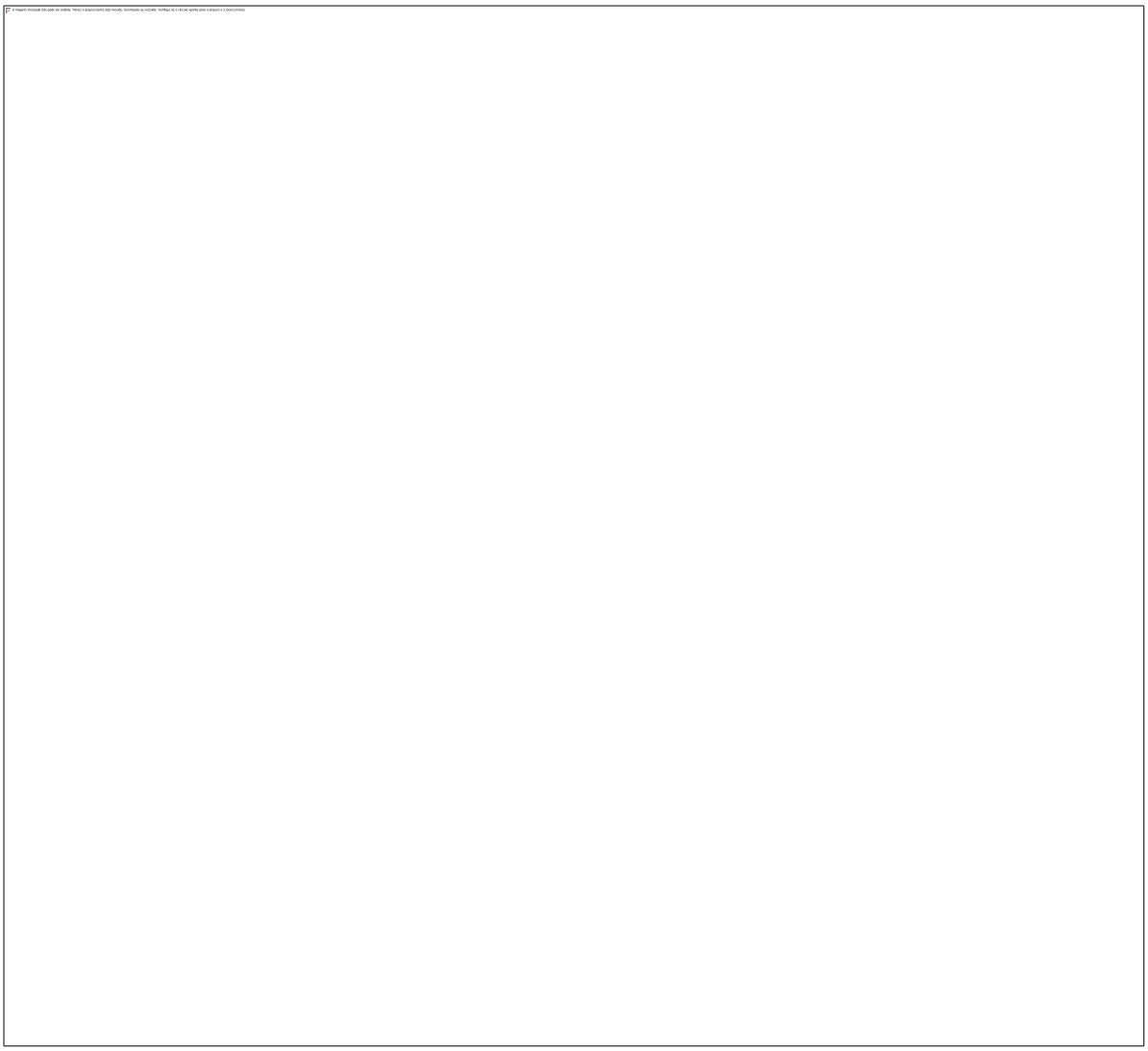


figura 1

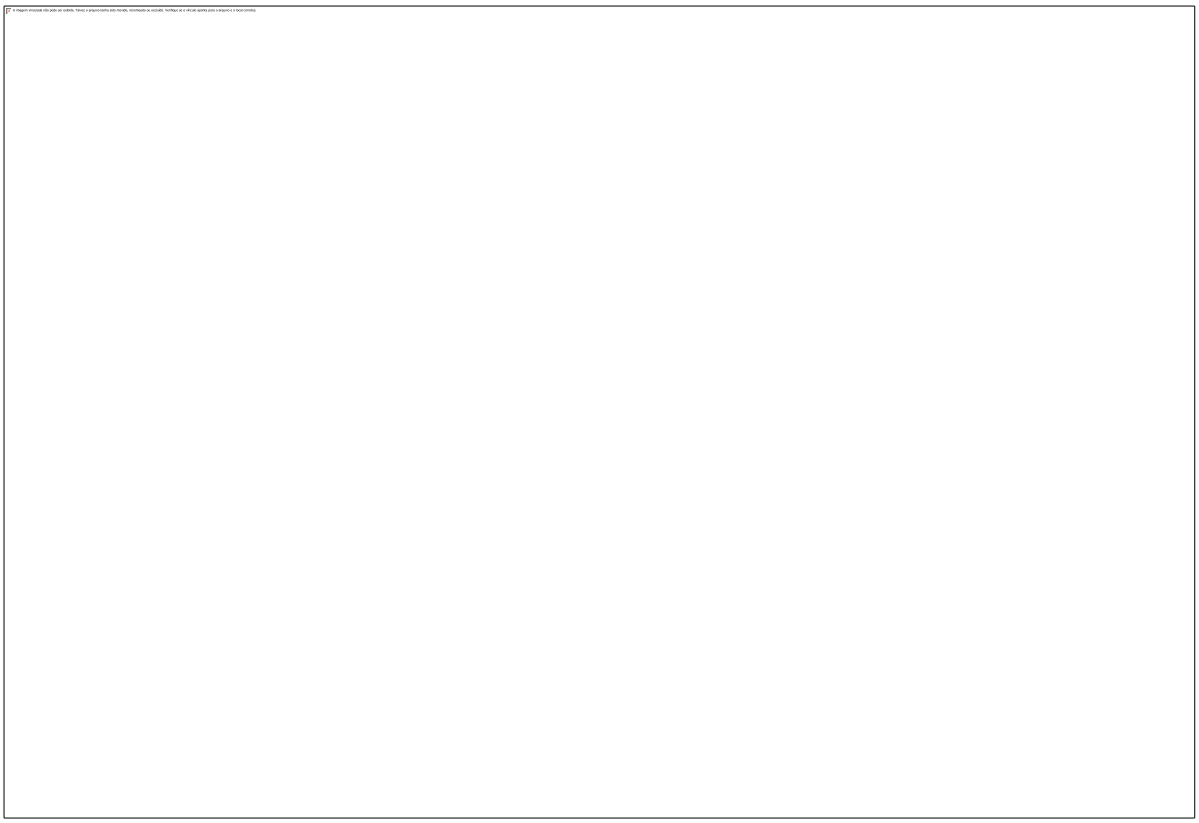


figura 2

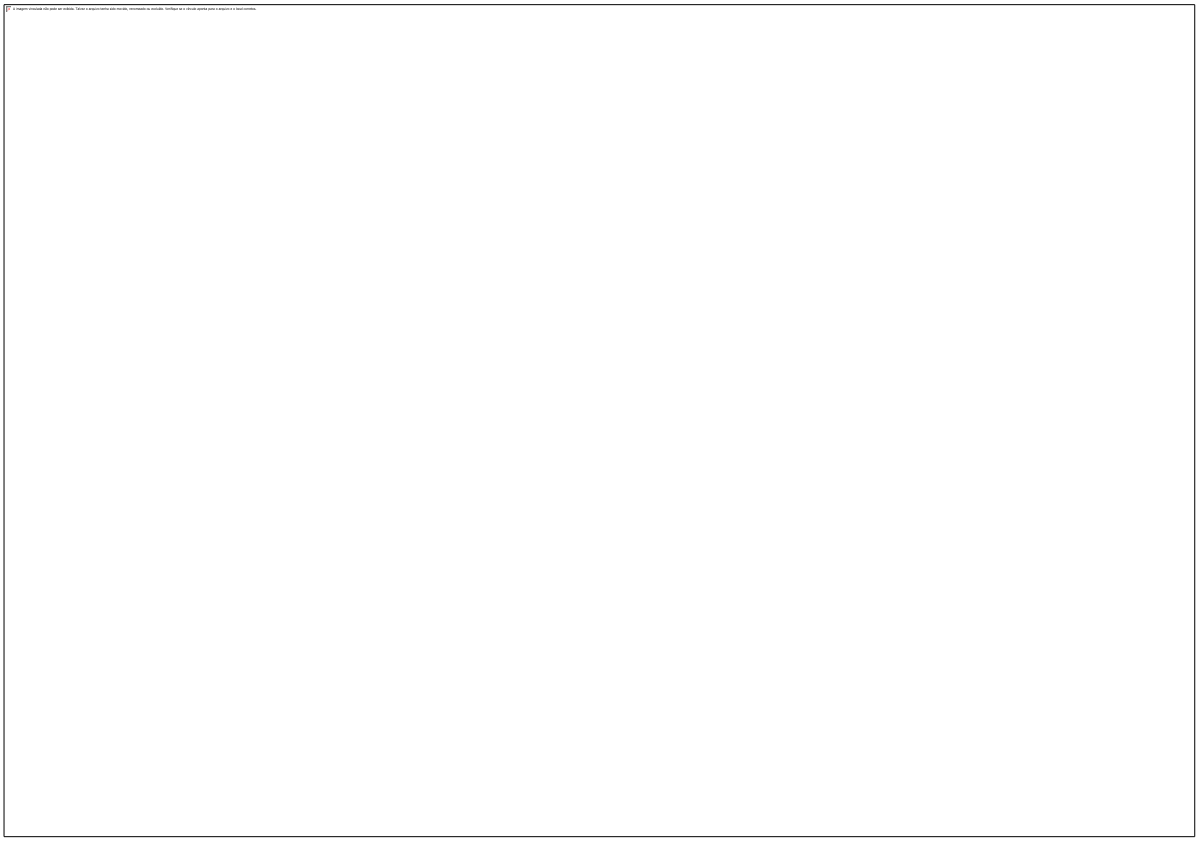


figura 3

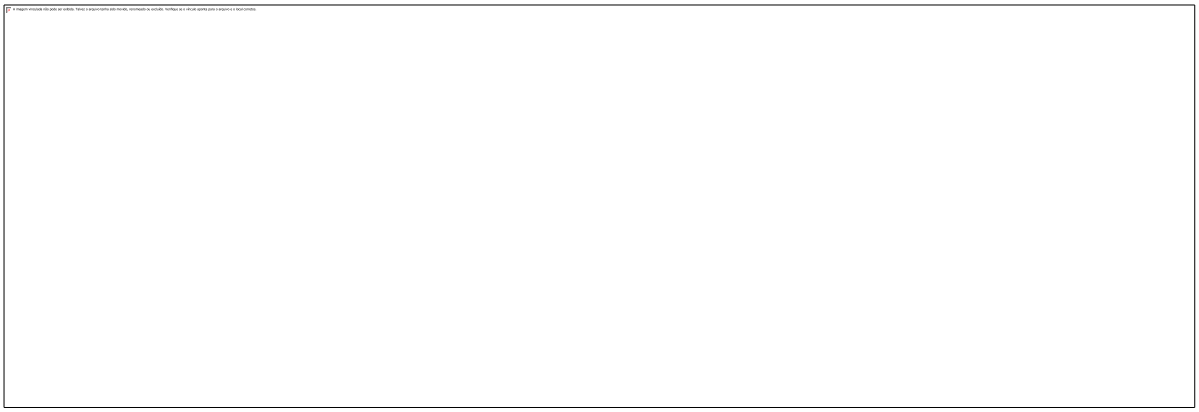


tabela 1

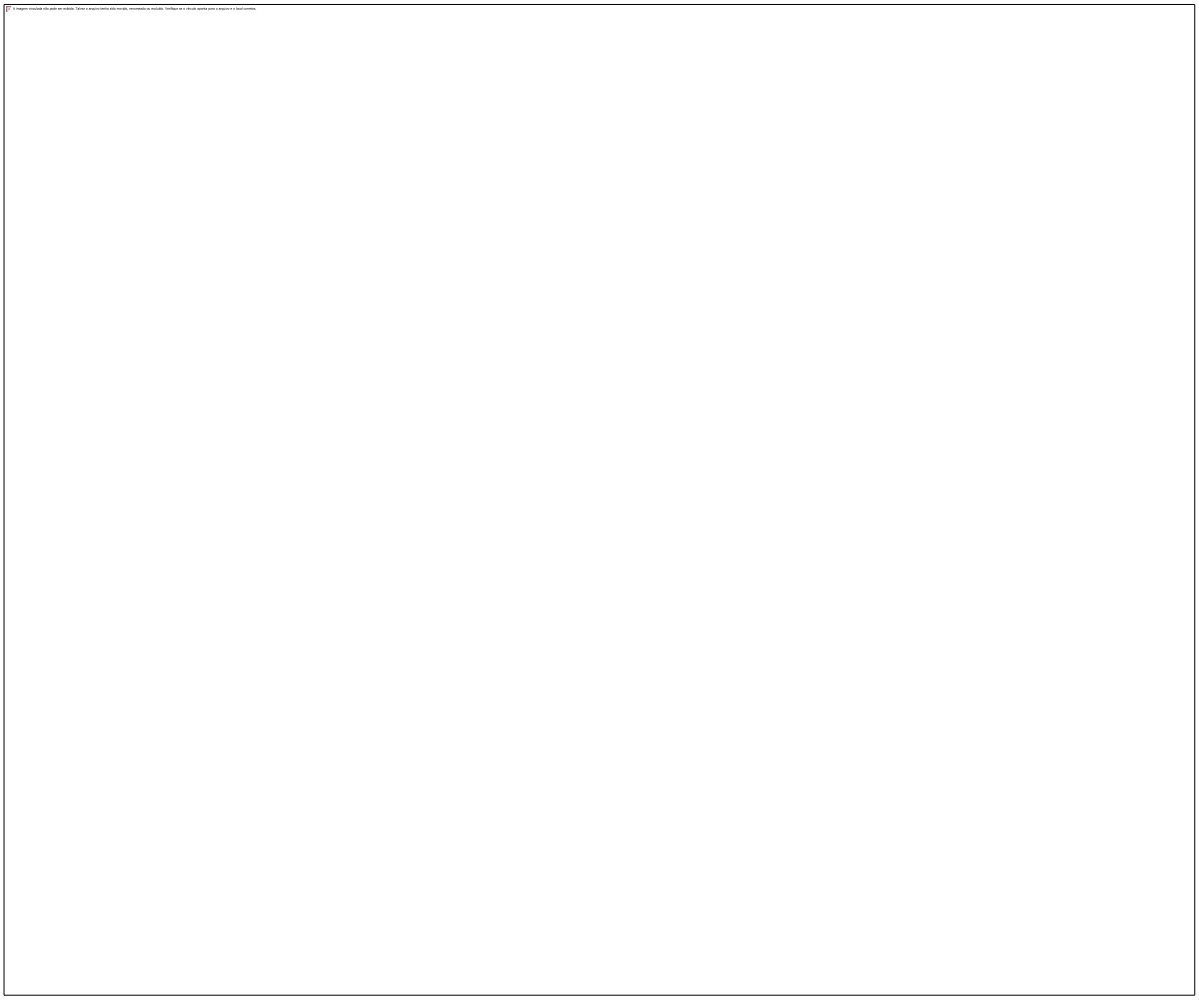


figura 4

CÓDIGO: ET1371

AUTOR: MARCOS AURELIO TAVARES FILHO

ORIENTADOR: HELTON MAIA PEIXOTO

TÍTULO: Modelagem de Controle Inteligente de Drones Utilizando Aprendizado por Reforço.

Resumo

O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) expandiu-se em múltiplos setores, exigindo sistemas autônomos de navegação e evasão de obstáculos robustos e capazes de responder rapidamente a ambientes dinâmicos. Este trabalho investiga o uso de aprendizado por reforço profundo, especificamente Deep Q-Network (DQN) e Proximal Policy Optimization (PPO) para o controle inteligente de drones. A metodologia adotou simulações na linguagem Python, evoluindo de uma matriz-mundo desenvolvida em NumPy para o framework Gymnasium. O treinamento do DQN utilizou estratégia de exploração epsilon-greedy com decaimento, mitigando colisões e alcançando convergência nos ambientes discretos de dimensão 4x4 e 29x11. Posteriormente, o algoritmo PPO foi aplicado no controle de ações contínuas, utilizando redes neurais distintas para Ator e Crítico, com a técnica de agrupamento de quadros (frame stacking). Os resultados indicaram a consolidação e convergência do DQN em espaços discretos, enquanto o PPO apresentou degradação de recompensa e alta entropia ao longo de 7.000 episódios, apontando a necessidade de refinar os hiperparâmetros para o problema. Conclui-se que algoritmos de aprendizado por reforço demonstram viabilidade para o controle de navegação de drones, estabelecendo como trabalhos futuros a otimização do PPO, exploração do framework Gymnasium e execução de ensaios no mundo real.

Palavras-chave: Drones. Aprendizado por Reforço. Navegação Autônoma. DQN. PPO.

TITLE: Intelligent Drone Control Modeling Using Reinforcement Learning.

Abstract

The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has expanded across multiple sectors, demanding robust autonomous navigation and obstacle evasion systems capable of reacting swiftly to dynamic environments. This work investigates deep reinforcement learning techniques, specifically Deep Q-Network (DQN) and Proximal Policy Optimization (PPO), for intelligent drone control. The methodology employed Python-based simulations, progressing from a grid world implemented in NumPy to the Gymnasium framework. DQN training utilized an epsilon-greedy exploration strategy with decay, successfully mitigating short-term collision patterns and achieving convergence in both 4x4 and 29x11 discrete environments. Subsequently, the PPO algorithm was applied to continuous actions using distinct Actor and Critic neural networks along with frame stacking techniques. Results demonstrated successful DQN convergence in discrete spaces, whereas PPO exhibited reward degradation and increasing entropy over 7,000 episodes, highlighting the need for hyperparameter refinement. The study concludes that reinforcement learning algorithms are viable for drone navigation control, proposing future work focused on PPO optimization, further Gymnasium environment modeling, and practical real-world testing.

Keywords: Drones. Reinforcement Learning. Autonomous Navigation. DQN. PPO.

Introdução

UAVs, comumente conhecidos como drones ou sistemas de aeronaves não tripuladas (UASs), têm sido amplamente adotados em diversos setores, incluindo aplicações militares, agricultura de precisão, sistemas de cidades inteligentes, conservação e monitoramento da fauna silvestre, logística e serviços de entrega. Essa ampla adoção evidencia a necessidade de sistemas avançados de navegação aero robótica capazes de responder rapidamente a ambientes dinâmicos, realizar o rastreamento de objetos em movimento e executar tarefas de prevenção de colisões e evasão de obstáculos (AKANBI; AYOMOH, 2025).

Diante desse contexto, o presente trabalho dedica-se a explorar técnicas de aprendizado por reforço, , como o Deep Q-Network - DQN (MNIH et al., 2015) e o Proximal Policy Optimization - PPO (SCHULMAN et al., 2017), com o intuito do desenvolvimento de estratégias para o controle inteligente de drones. Essa abordagem se baseia na crescente aplicação de métodos de aprendizado profundo à navegação autônoma de veículos aéreos não tripulados, bem como no emprego de técnicas de aprendizado por reforço para tomada de decisão, planejamento de trajetória e controle em ambientes complexos (KANELLÁKIS; NIKOLAKOPOULOS, 2017; ARIYASENA et al., 2024; CHEN et al., 2026).

Metodologia

O presente trabalho se baseia na comparação de desempenho entre algoritmos de aprendizado de reforço (Deep Q-Network e Proximal Policy Optimization). Para isso, a simulação de ambientes reais de navegação de drones foi fundamental. Com o intuito de retratar um espaço com ações discretas, isto é, aquele que as transições entre os estados são limitadas, utilizou-se o Numpy (HARRIS et al., 2020) para a criação da matriz-mundo. Ela descreve o mapa de um mundo (inicialmente de dimensão 4x4 e, posteriormente, 29x11) em que os elementos 0 representam caminhos bloqueados, pontos com valor 1 representam rotas viáveis. Nessa configuração, o espectro de ações possíveis pertencem ao conjunto das quatro direções (direita, esquerda, cima, embaixo).

Durante o desenvolvimento do trabalho, no entanto, optou-se pelo Gymnasium (TOWERS et al., 2023), biblioteca open-source escrita em Python, não somente devido a facilidade de integração com interface gráfica, como também devido a capacidade de personalização de ambientes. Tal escolha, além de permitir testes mais elaborados com as ações discretas (DQN), possibilitou a expansão para um mundo de ações contínuas, adequado para algoritmo baseado em políticas (PPO).

Ressalta-se que o mesmo ambiente de execução (Python 3.12.3, NVIDIA GPU 3060, Ubuntu 24.04) foi utilizado nos experimentos. Isso ocorre para que a avaliação do desempenho dos algoritmos, mensurada pela recompensa acumulada ao longo dos episódios, não seja privilegiada pelo momento de execução do programa.

Sobre as tecnologias empregadas, utilizou-se a linguagem de programação Python, no tratamento das imagens e processamento das mensagens, e o sistema operacional Ubuntu 22.04. Desse modo, é notável que a metodologia adotada enfatiza procedimentos experimentais.

Resultados e Discussões

A modelagem do mapa em NumPy demandou maior esforço empírico no ajuste da função de recompensa. Para facilitar a calibração desses valores, o mapa foi redimensionado de 29x11 para um ambiente de 4x4. Experimentalmente, estabeleceu-se as seguintes pontuações: -10 para colisões, -1 para passos de transição e +100 para a conclusão do objetivo, com incentivo numérico para que o agente priorize a meta. No treinamento do Deep Q-Network (DQN), a fim de mitigar o aprendizado de padrões de colisão a curto prazo, implementou-se uma estratégia de exploração epsilon-greedy com decaimento. Para isso, o parâmetro epsilon foi inicializado em 1,0, com taxa de decaimento de 0,995 por episódio. A Figura 1 ilustra o treinamento do algoritmo ao longo de 5.000 episódios. Na esquerda, observa-se o resultado para o ambiente reduzido, enquanto, na direita, representa-se as recompensas acumuladas para o mapa 29x11. Cada gráfico apresenta as recompensas obtidas a cada episódio (linha azul) e a média móvel de 50 amostras (linha vermelha). Veja que o início da convergência está entre 500 a 2.000 episódios, um comportamento esperado devido à dimensão reduzida do espaço de estados e à capacidade da rede neural estruturada com 160 neurônios. No ambiente de 4x4, assim como em 29x11, os resultados ideais (calculado manualmente) de 96 e -26, respectivamente, são atingidos.

Após a validação da convergência no ambiente NumPy e a consolidação do algoritmo DQN, a simulação foi migrada para o framework Gymnasium. Nessa nova etapa, o espaço de observações, que anteriormente se limitava às coordenadas (x, y), foi expandido para incorporar as velocidades lineares e angulares. A Figura 2 demonstra a interface gráfica desenvolvida com o Gymnasium. Os pontos vermelhos indicam os obstáculos, enquanto o círculo verde indica o objetivo a ser atingido.

A partir desse cenário modelado, o controle do drone foi avaliado utilizando espaços de ações discretos e contínuos. Para o modelo discreto, a formulação se baseou no produto cartesiano de um conjunto de quatro elementos, resultando em 16 atuações possíveis. Já na abordagem contínua, utilizaram-se pares ordenados definidos no intervalo fechado [-1, 1]. Essa modelagem das ações foi fundamentada em ambientes de referência da própria biblioteca, como o BipedalWalker e o MountainCarContinuous.

Para a avaliação do modelo de ações discretas, manteve-se a utilização do algoritmo DQN. Contudo, considerando que essa abordagem já havia sido validada nos experimentos prévios em NumPy, o foco das simulações no ambiente Gymnasium direcionou-se à aplicação do algoritmo Proximal Policy Optimization (PPO) para o controle no espaço de ações contínuas.

Para o treinamento do agente com o PPO, a atualização da política de navegação foi parametrizada para ocorrer a cada 8 episódios. O processo ocorreu por 7.000 episódios, com um limite de 800 passos por episódio. Levando em consideração a dinâmica temporal do ambiente, aplicou-se a técnica de frame stacking agrupando 4 observações consecutivas. Os hiperparâmetros da rede foram definidos com uma taxa de aprendizado de 0,00025, coeficiente de entropia de 0,001 e fator de desconto de 0,99.

Considerando a arquitetura baseada em Ator e Crítico inerente ao PPO, implementaram-se duas redes neurais distintas. A primeira (256 neurônios), atuando como Crítico, avalia a qualidade da ação tomada em comparação às demais alternativas do estado; já a segunda (320 neurônios), o Ator, infere a média e o logaritmo do desvio padrão das ações factíveis. A partir dessa definição estrutural, iniciou-se a interação do agente com o ambiente. A Figura 3 ilustra a evolução da média móvel das recompensas (à esquerda, em azul) e da entropia (à direita, em roxo) em função dos episódios de treinamento. Observa-se que a entropia aumenta progressivamente enquanto as recompensas sofrem degradação, comportamento que evidencia que o algoritmo não foi devidamente ajustado em termos de hiperparâmetros para o problema.

Conclusão

O presente trabalho demonstra a viabilidade do controle de navegação de drones utilizando técnicas de aprendizado por reforço, com os algoritmos DQN e PPO. Apesar do estudo não ter contemplado a validação física em ambientes de laboratório, nota-se que, mediante o ajuste adequado do algoritmo, o desempenho tem potencial para

alcançar o comportamento ideal. Como trabalhos futuros para a continuidade desta pesquisa, propõem-se: a realização de novos testes com o PPO explorando diferentes hiperparâmetros; a aplicação de outras estratégias de aprendizado por reforço, a expansão e o detalhamento da modelagem do ambiente no framework Gymnasium; e, por fim, a execução de ensaios práticos com drones no mundo real.

Referências

AKANBI, I.; AYOMOH, M. Event-based vision application on autonomous unmanned aerial vehicle: a review of prospects and challenges. Sensors, v. 26, n. 1, p. 81, 2025.

ARIYASENA, H. H. S. et al. Estimation of soil moisture in drip-irrigated citrus orchards using drone data and machine learning. Agricultural Water Management, v. 302, 2024.

CHEN, X. et al. Deep reinforcement learning for autonomous navigation of UAVs in complex environments. IEEE Transactions on Robotics, v. 42, p. 112-125, 2026.

HARRIS, C. R. et al. Array programming with NumPy. Nature, v. 585, n. 7825, p. 357-362, 2020.

KANELLÁKIS, C.; NIKOLAKOPOULOS, G. On vision enabled aerial manipulation for multirotors. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Anais... IEEE, 2017. p. 1-7. MNIH, V. et al. Human-level control through deep reinforcement learning. Nature, v. 518, n. 7540, p. 529-533, 2015.

SCHULMAN, J. et al. Proximal policy optimization algorithms. arXiv preprint arXiv:1707.06347, 2017.TOWERS, M. et al. Gymnasium. Zenodo, 2023. Disponível em: https://zenodo.org/record/8127025.

Anexos



Figura 1: Desempenho do DQN ao longo dos episódios (4x4 e 29x11)



Figura 2: Ambiente gráfico desenvolvido com o framework Gymnasium.

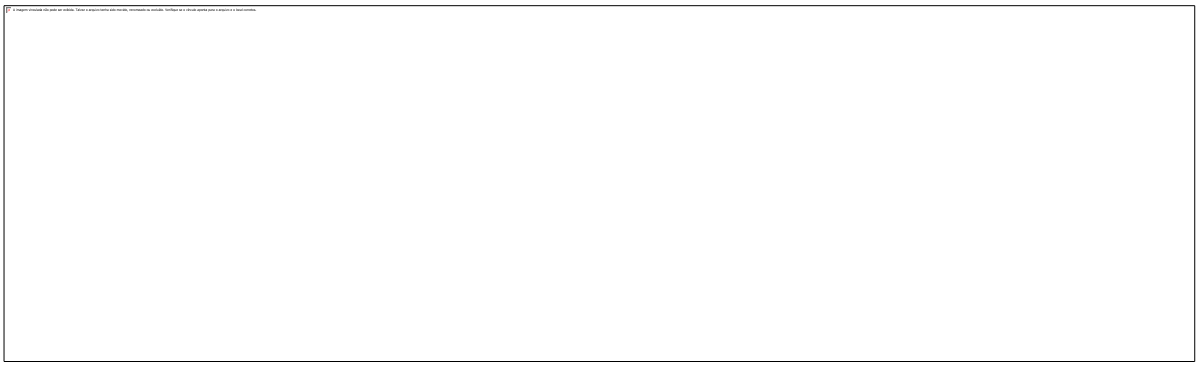


Figura 3: Desempenho do PPO no ambiente do Gymnasium (recompensas e entropia x episódios)

CÓDIGO: ET1382

AUTOR: JOSE MARIO NOBREGA JALES DANTAS

ORIENTADOR: RUMMENIGGE RUDSON DANTAS

TÍTULO: Estudo de tecnologias para estimativa da pose do corpo humano em movimentos de remo

Resumo

O envelhecimento está associado a alterações no equilíbrio, no tempo de reação e no controle postural, aumentando o risco de quedas e comprometendo a independência funcional dos idosos. Nesse contexto, a Realidade Virtual (RV) apresenta-se como uma ferramenta promissora para a reabilitação, possibilitando a criação de ambientes interativos e a utilização de diferentes formas de feedback durante o treinamento motor. Este plano de trabalho está vinculado ao projeto VirtuAlter e tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento, aprimoramento e avaliação de um sistema de RV voltado ao treinamento do equilíbrio dinâmico de idosos, utilizando a Wii Balance Board como dispositivo de interação. As atividades previstas compreendem levantamento bibliográfico, estudo da arquitetura do sistema, capacitação nas ferramentas e equipamentos utilizados, apoio ao desenvolvimento do ambiente virtual, integração e testes da interface de interação, implementação e avaliação de mecanismos de feedback, realização de testes funcionais, organização e análise de dados e produção científica. Espera-se contribuir para o aprimoramento de uma solução tecnológica aplicada à reabilitação, além de gerar conhecimentos sobre a utilização de jogos digitais e RV no treinamento do equilíbrio dinâmico. O plano também proporcionará ao olsista formação em pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico e inovação, promovendo a integração entre Ciência da Computação, Realidade Virtual e área da saúde.

Palavras-chave: Realidade Virtual; Reabilitação; Equilíbrio Dinâmico; Jogos Digitais;

TITLE: Development and Evaluation of a Virtual Reality System for Dynamic Balance Training in Older Adults

Abstract

Aging is associated with changes in balance, reaction time, and postural control, increasing the risk of falls and compromising the functional independence of older adults. In this context, Virtual Reality (VR) has emerged as a promising tool for rehabilitation, enabling the development of interactive environments and the use of different types of feedback during motor training. This work is linked to the VirtuAlter

research project and aims to contribute to the development, improvement, and evaluation of a VR system designed for dynamic balance training in older adults, using the Wii Balance Board as an interaction device. The activities will include a literature review, study of the system architecture, training in the tools and equipment used, support for the development of the virtual environment, integration and testing of the interaction interface, implementation and evaluation of feedback mechanisms, functional testing, organization and analysis of collected data, and scientific dissemination. The expected results include contributions to the improvement of a technological solution applied to rehabilitation and the generation of knowledge about the use of digital games and VR for dynamic balance training. The work will also contribute to the student's academic and professional development in scientific research, technological development, and innovation, promoting interdisciplinary integration between Computer Science, Virtual Reality, and Health Sciences.

Keywords: Virtual Reality; Rehabilitation; Dynamic Balance; Digital Games; Older

Introdução

O envelhecimento populacional constitui um fenômeno crescente e traz consigo importantes desafios relacionados à manutenção da autonomia e da qualidade de vida das pessoas idosas. Entre as alterações decorrentes do processo de envelhecimento destacam-se déficits no controle postural, redução do equilíbrio, diminuição da capacidade funcional e aumento do tempo de reação, fatores que podem contribuir para a ocorrência de quedas e para a perda de independência funcional. Estudos apontam que o tempo de reação é uma variável relevante para a identificação de alterações relacionadas ao envelhecimento e apresenta associação com o risco de quedas em idosos (LORD; FITZPATRICK, 2001; LAJOIE; GALLAGHER, 2004). Nesse contexto, estratégias de treinamento e reabilitação que estimulem o equilíbrio e a capacidade de resposta motora tornam-se relevantes. A Realidade Virtual (RV) tem sido investigada como uma alternativa complementar às abordagens convencionais de reabilitação, possibilitando a criação de ambientes interativos nos quais o usuário pode realizar tarefas motoras de maneira controlada e receber informações sobre seu desempenho. A utilização de jogos digitais nesse contexto também pode favorecer o engajamento e a motivação dos participantes, além de possibilitar a repetição de tarefas e a adaptação dos estímulos às necessidades individuais (ALBUQUERQUE; SCALABRIN, 2007; PEDRAZA-HUESO et al., 2015). Entre as tecnologias utilizadas para aplicações de reabilitação destaca-se a Wii Balance Board (WBB), dispositivo equipado com sensores capazes de captar a distribuição de carga corporal e informações relacionadas ao posicionamento do centro de gravidade. Sua utilização tem sido investigada como ferramenta para avaliação e treinamento do equilíbrio, apresentando potencial para fornecer feedback em tempo real ao usuário (RENDON et al., 2012). Entretanto, sua utilização em tarefas que envolvem equilíbrio dinâmico apresenta limitações relacionadas à interação e à necessidade de adaptação do dispositivo para diferentes demandas motoras. Além disso, a literatura destaca a importância do feedback durante processos de aprendizagem e reabilitação motora. A disponibilização de informações sobre o desempenho pode auxiliar o indivíduo na compreensão e correção de seus movimentos, sendo possível utilizar diferentes formas de feedback de acordo com os objetivos terapêuticos e as características do usuário (BARANDAS; GAMBOA; FONSECA, 2015). Dessa forma, sistemas computacionais capazes de individualizar

essas informações podem ampliar as possibilidades de utilização da RV em contextos de reabilitação. Nesse cenário, o projeto VirtuAlter propõe o desenvolvimento de um sistema de Realidade Virtual voltado ao treinamento do equilíbrio dinâmico de idosos, utilizando a Wii Balance Board como dispositivo de interação. O sistema busca integrar um ambiente virtual baseado em jogos digitais a tarefas motoras relacionadas à subida e descida de degraus, permitindo a obtenção de informações como percentual de descarga de peso, oscilação do centro de gravidade, tempo de reação e tempo de movimento. Assim, este plano de trabalho está inserido na perspectiva de desenvolvimento e avaliação de tecnologias computacionais aplicadas à saúde, buscando contribuir para o aprimoramento do sistema VirtuAlter, para a realização de testes e análise de seu funcionamento e para a produção de conhecimentos sobre a aplicação da Realidade Virtual no treinamento do equilíbrio dinâmico. A proposta também possibilita uma abordagem interdisciplinar envolvendo Ciência da Computação, Realidade Virtual, jogos digitais e Ciências da Saúde, contribuindo para a formação científica e tecnológica do bolsista.

Metodologia

presente plano de trabalho será desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa VirtuAlter, realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), com abordagem aplicada e caráter interdisciplinar, envolvendo Ciência da Computação, Realidade Virtual e Ciências da Saúde. As atividades serão conduzidas no Laboratório de Realidade Virtual, conforme o planejamento e os protocolos estabelecidos pelo projeto de pesquisa. Inicialmente, será realizado um levantamento bibliográfico em bases de dados científicas sobre Realidade Virtual, jogos digitais aplicados à reabilitação, equilíbrio dinâmico, treinamento motor, feedback aumentado e utilização de dispositivos de interação em processos de reabilitação de idosos. A revisão terá como finalidade fundamentar as decisões relacionadas ao desenvolvimento e à avaliação do sistema. Na etapa seguinte, será realizada a familiarização com a arquitetura e os componentes do sistema VirtuAlter, incluindo o ambiente virtual, os mecanismos de interação e os dispositivos utilizados para aquisição de dados. A Wii Balance Board (WBB) será utilizada como principal dispositivo de interação, considerando sua capacidade de registrar informações relacionadas à distribuição de carga e ao deslocamento do centro de gravidade. Também serão estudadas as interfaces responsáveis pela comunicação entre o dispositivo e o sistema computacional. O desenvolvimento e o aprimoramento do sistema serão realizados de forma incremental. O ambiente virtual deverá representar um cenário no qual o usuário controla um avatar durante uma caminhada e realiza tarefas relacionadas à transposição de obstáculos, especialmente a subida e descida de um degrau. A interação com o ambiente ocorrerá por meio da execução de movimentos sobre a WBB e do tapete desenvolvido para o sistema. Serão implementados e/ou avaliados mecanismos de feedback visual e auditivo relacionados ao desempenho do usuário. Esses mecanismos poderão apresentar informações sobre o cumprimento das metas da tarefa e, quando aplicável, dados biomecânicos obtidos pela WBB, como percentual de descarga de peso e oscilação do centro de gravidade. A definição e aplicação dos mecanismos seguirão as especificações estabelecidas no projeto de pesquisa e nos protocolos experimentais aprovados. Após as etapas de desenvolvimento, serão realizados testes funcionais e técnicos do sistema, verificando o funcionamento dos dispositivos de interação, a comunicação entre hardware e software, o registro dos dados, a resposta aos estímulos e o correto

funcionamento das mecânicas do jogo. Eventuais erros identificados serão registrados e corrigidos de maneira iterativa. Nos testes experimentais com participantes, serão observados os procedimentos estabelecidos no protocolo do projeto VirtuAlter e as normas éticas aplicáveis. Os participantes serão previamente informados sobre os procedimentos e somente participarão após a assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). Durante as atividades, serão adotados os procedimentos de segurança previstos no projeto, incluindo a utilização de cadeira e andador como suporte preventivo durante a execução das tarefas de equilíbrio. Os dados obtidos pelo sistema serão organizados em banco de dados para posterior análise. Entre as variáveis de interesse estarão o tempo de reação, o tempo de movimento, o desempenho nas tarefas, o percentual de descarga de peso e a oscilação do centro de gravidade. Quando pertinente ao protocolo experimental, também serão considerados os dados relacionados à atividade eletroencefalográfica obtidos por meio do equipamento Emotiv EPOC. A análise dos dados será realizada de acordo com os objetivos e procedimentos estatísticos definidos pelo projeto de pesquisa, buscando identificar padrões de desempenho e possíveis alterações decorrentes da utilização do sistema de Realidade Virtual. Os resultados serão comparados e discutidos com base na literatura científica consultada. Por fim, serão realizadas a documentação das etapas de desenvolvimento, sistematização dos resultados, elaboração de relatórios científicos e preparação de resumos, apresentações e/ou artigos para divulgação dos resultados em eventos e meios científicos. Todas as atividades serão desenvolvidas sob orientação do coordenador do projeto e em conformidade com o protocolo de pesquisa aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos durante o desenvolvimento e a avaliação do sistema VirtuAlter serão apresentados de forma descritiva e, quando aplicável, por meio de tabelas, gráficos e indicadores de desempenho. Serão considerados dados relacionados ao funcionamento do sistema, à interação dos participantes com o ambiente virtual e às variáveis obtidas durante as tarefas de equilíbrio dinâmico. Na avaliação experimental, serão analisadas variáveis como tempo de reação, tempo de movimento, desempenho nas tarefas, percentual de descarga de peso e oscilação do centro de gravidade. Quando previsto no protocolo experimental, também serão considerados os dados relacionados à atividade eletroencefalográfica. Os resultados serão organizados de acordo com os grupos de intervenção e com os diferentes tipos de feedback utilizados durante o treinamento. A discussão dos resultados será realizada a partir da comparação entre os dados obtidos no estudo e os achados descritos na literatura científica. Serão considerados estudos relacionados à utilização da Realidade Virtual, jogos digitais e dispositivos como a Wii Balance Board no treinamento e avaliação do equilíbrio de idosos. Dessa forma, será analisado se os resultados encontrados apresentam comportamento semelhante ou divergente em relação às evidências disponíveis. Também serão discutidos os possíveis efeitos dos diferentes tipos de feedback sobre o desempenho dos participantes, considerando a importância do feedback aumentado nos processos de aprendizagem motora e reabilitação. Os resultados relacionados ao tempo de reação, tempo de movimento e às variáveis biomecânicas serão analisados considerando sua relevância para o equilíbrio dinâmico e para a redução dos fatores associados ao risco de quedas em idosos. Além dos resultados clínicos e funcionais, serão discutidos aspectos tecnológicos do sistema, incluindo sua estabilidade,

funcionamento dos dispositivos de interação, capacidade de registro dos dados e adequação das mecânicas do jogo às tarefas propostas. Eventuais limitações técnicas ou metodológicas identificadas durante o desenvolvimento e a experimentação também serão apresentadas. Ao final, os resultados serão interpretados considerando os objetivos estabelecidos no plano de trabalho, permitindo avaliar as contribuições do sistema VirtuAlter para o desenvolvimento de tecnologias de Realidade Virtual aplicadas à reabilitação e identificar possibilidades de aprimoramento para futuras pesquisas.

Conclusão

Espera-se que o desenvolvimento e a avaliação do sistema VirtuAlter contribuam para o avanço da utilização da Realidade Virtual e dos jogos digitais como ferramentas de apoio ao treinamento do equilíbrio dinâmico de idosos. O estudo poderá proporcionar informações relevantes sobre a utilização da Wii Balance Board, diferentes mecanismos de feedback e variáveis relacionadas ao desempenho motor e ao equilíbrio. Além da contribuição tecnológica e científica, o trabalho deverá possibilitar a identificação de aspectos que possam ser aprimorados no sistema, favorecendo sua aplicação em futuras pesquisas e protocolos de reabilitação. Recomenda-se que estudos posteriores ampliem a investigação com diferentes perfis de usuários, períodos de intervenção e estratégias de feedback, contribuindo para o desenvolvimento de soluções de Realidade Virtual cada vez mais individualizadas, acessíveis e adequadas às necessidades da população idosa.

Referências

ALBUQUERQUE, E. C.; SCALABRIN, E. E. O uso do computador em programas de reabilitação neuropsicológica. Psicologia Argumento, v. 25, n. 50, p. 269-275, 2007. BARANDAS, M.; GAMBOA, H.; FONSECA, J. M. A real time biofeedback system using visual user interface for physical rehabilitation. Procedia Manufacturing, v. 3, p. 823-828, 2015. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.337. BADCOCK, N. A. et al. Validation of the Emotiv EPOC® EEG gaming system for measuring research quality auditory ERPs. PeerJ, v. 1, e38, 2013. DOI: 10.7717/peerj.38. BURKE, J. W. et al. Designing engaging, playable games for rehabilitation. 2010. DEUTSCH, J. E. et al. Use of a low-cost, commercially available gaming console (Wii) for rehabilitation of an adolescent with cerebral palsy. Physical Therapy, v. 88, n. 10, p. 1196-1207, 2008. LAJOIE, Y.; GALLAGHER, S. P. Predicting falls within the elderly community: comparison of postural sway, reaction time, the Berg balance scale and the Activities-specific Balance Confidence (ABC) scale for comparing fallers and non-fallers. Archives of Gerontology and Geriatrics, v. 38, n. 1, p. 11-26, 2004. DOI: 10.1016/S0167-4943(03)00082-7. LORD, S. R.; FITZPATRICK, R. C. Choice stepping reaction time: a composite measure of falls risk in older people. The Journals of Gerontology: Series A, v. 56, n. 10, p. M627-M632, 2001. DOI: 10.1093/gerona/56.10.M627. LUCCA, L. F. Virtual reality and motor rehabilitation of the upper limb after stroke: a generation of progress? Journal of Rehabilitation Medicine, v. 41, n. 12, p. 1003-1006, 2009. DOI: 10.2340/16501977-0405. PEDRAZA-HUESO, M. et al. Rehabilitation using Kinect-based games and virtual reality. Procedia

Computer Science, v. 75, p. 161-168, 2015. DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.233. RAMCHANDANI, A. et al. Wiihabilitation increases participation in therapy. In: Proceedings of Virtual Rehabilitation. Vancouver, 2008. RENDON, A. A. et al. The effect of virtual reality gaming on dynamic balance in older adults. Age and Ageing, v. 41, n. 4, p. 549-552, 2012. DOI: 10.1093/ageing/afs053. SHAH, N.; BASTERIS, A.; AMIRABDOLLAHIAN, F. Virtual reality and rehabilitation: the importance of patient-centered design and feedback. 2014.

CÓDIGO: ET1398

AUTOR: CAROLYNNE AUGUSTA ALVES CARDOSO

COAUTOR: PAULA ANDRESSA ALVES DE ARAÚJO

ORIENTADOR: KELLEN CARLA LIMA

TÍTULO: Influência da variabilidade climática no aquífero Dunas/Barreiras e a Lagoa do Bonfim/RN

Resumo

A região da Lagoa do Bonfim/RN apresenta forte interação entre águas superficiais e subterrâneas, tornando importante compreender a influência da variabilidade climática sobre esse sistema. Este estudo teve como objetivo relacionar a precipitação ao comportamento dos níveis de água subterrânea, considerando períodos de El Niño, La Niña e neutralidade. Foram utilizados dados de precipitação da estação Engenho e registros do P03–Pz01 entre julho de 1999 e julho de 2005. As séries mensais foram analisadas pelo coeficiente de correlação de Pearson, com defasagens de zero a seis meses. Nos dois períodos de La Niña, a maior correlação negativa ocorreu no Lag 1, com r = -0,945 na La Niña forte e r = -0,622 na La Niña fraca. Nos períodos neutros, as maiores associações ocorreram nos Lags 2 e 1. No El Niño moderado, a maior correlação negativa ocorreu no Lag 0, e no El Niño fraco, no Lag 2. Os resultados mostram que a resposta do nível subterrâneo à precipitação não apresenta um único padrão temporal e pode variar entre diferentes condições climáticas.

Palavras-chave: Águas subterrâneas; Precipitação; ENOS; Lagoa do Bonfim

TITLE: Influence of Climate Variability on the Dynamics of the Dunas/Barreiras Aquifer System and Bonfim Lagoon – RN

Abstract

The Bonfim Lagoon region, in Rio Grande do Norte, Brazil, is characterized by strong interaction between surface water and groundwater, making it important to understand the influence of climate variability on this system. This study aimed to relate precipitation to groundwater-level behavior during El Niño, La Niña, and neutral conditions. Precipitation data from the Engenho station and records from P03–Pz01 were analyzed from July 1999 to July 2005. Monthly series were evaluated using Pearson's correlation coefficient with lags from zero to six months. During both La Niña periods, the strongest negative correlation occurred at Lag 1, with r = -0.945 for strong La Niña and r = -0.622 for weak La Niña. During neutral periods, the strongest

associations occurred at Lags 2 and 1. Moderate El Niño showed the strongest negative correlation at Lag 0, while weak El Niño showed it at Lag 2. The results indicate that groundwater response to precipitation does not follow a single temporal pattern and may vary under different climate conditions.

Keywords: Groundwater; Precipitation; ENSO; Bonfim Lagoon

Introdução

A região da Lagoa do Bonfim, no litoral leste do Rio Grande do Norte, possui relevância ambiental, social e econômica, especialmente por sua participação na disponibilidade hídrica e no abastecimento de municípios do estado. A área apresenta forte interação entre águas superficiais e subterrâneas, sendo o sistema aquífero Dunas/Barreiras importante para a disponibilidade hídrica local (Melo; Feitosa; Silva, 2000; Manoel Filho; Castro, 2002).

Nesse contexto, este projeto se justifica pela necessidade de compreender o comportamento dos níveis de água do sistema hídrico local diante da variabilidade climática e de seus possíveis impactos sobre as reservas hídricas subterrâneas (Hirata; Conicelli, 2012; Diniz Filho; Macedo; Melo, 2015). Alterações nos padrões de precipitação podem modificar a recarga dos aquíferos e, consequentemente, a quantidade de água subterrânea disponível (Hirata; Conicelli, 2012). Além disso, a resposta do nível de água subterrânea à precipitação pode não ocorrer de maneira imediata, considerando o tempo necessário para que a água infiltre no solo, atravesse a zona não saturada e contribua para a recarga do aquífero (Healy; Cook, 2002).

Entre os fenômenos climáticos que podem interferir na distribuição das precipitações encontra-se o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), cujas fases quente e fria, conhecidas como El Niño e La Niña, podem estar relacionadas a mudanças nos padrões de precipitação no Nordeste brasileiro (Kayano; Andreoli, 2006). Entretanto, seus efeitos não ocorrem de maneira uniforme em toda a região. No litoral oriental do Rio Grande do Norte, a precipitação também sofre influência das condições do Atlântico Tropical e da atuação de sistemas atmosféricos regionais, como os Distúrbios Ondulatórios de Leste (Reboita; Santos, 2014; Gomes et al., 2015).

Dessa forma, os períodos de El Niño, La Niña e neutralidade foram utilizados como condições climáticas de comparação, sem serem tratados como os únicos fatores responsáveis pelas variações observadas. O objetivo geral deste estudo foi relacionar a variabilidade climática da precipitação com o comportamento dos níveis de água subterrânea na região da Lagoa do Bonfim/RN, considerando diferentes condições do ENOS durante o período analisado.

Metodologia

A área de estudo compreende a região da Lagoa do Bonfim, localizada na porção leste do Rio Grande do Norte, abrangendo parte dos municípios de Nísia Floresta e São José

de Mipibu. A região apresenta forte interação entre águas superficiais e subterrâneas e está associada ao sistema aquífero Dunas/Barreiras. Segundo a classificação de Köppen, apresenta clima As, tropical com verão seco (Alvares et al., 2013).

Foram utilizados dados diários de precipitação da estação meteorológica Engenho, situada no município de São José de Mipibu, referentes ao período de 01/01/1970 a 31/12/2020. Para a análise conjunta com os dados subterrâneos, foi considerado o intervalo entre julho de 1999 e julho de 2005. Na série pluviométrica foram identificados 213 registros diários ausentes, correspondendo a aproximadamente 1% da série disponibilizada. Também foram utilizados dados diários de evapotranspiração de referência (ETo) obtidos de Xavier et al. (2022), nas coordenadas da estação Engenho.

As falhas da precipitação foram preenchidas por meio da técnica de Imputação Múltipla, proposta por Rubin (1987), utilizando o algoritmo BootEM implementado no pacote Amelia II no software R. Conforme Araújo (2023), o procedimento gera múltiplas estimativas para os dados ausentes a partir de reamostragens bootstrap associadas ao algoritmo Expectation Maximization. A ETo foi empregada como variável auxiliar. Foram geradas cinco estimativas para cada valor ausente e, posteriormente, calculada a média aritmética entre elas. Eventuais valores negativos de precipitação gerados pela imputação foram substituídos por zero.

Para representar a dinâmica da água subterrânea, foram utilizados registros do P03–Pz01, obtidos no Relatório de Monitoramento do Sistema Lacustre do Bonfim da SERHID/COGERH. O ponto apresenta profundidade total de 95,0 m, cota topográfica de 69,76 m e altura da boca de 0,380 m. Como as medições foram realizadas em datas irregulares, os valores disponíveis foram organizados em escala mensal por meio da média aritmética das observações de cada mês. Não foi realizada imputação das lacunas do P03–Pz01.

O nível dinâmico utilizado representa a distância entre um ponto de referência adotado no piezômetro e a posição do nível da água (Cunningham; Schalk, 2011). Assim, quando o nível da água se eleva, a distância medida diminui; quando ocorre rebaixamento, essa distância aumenta.

Após o preenchimento das falhas, calculou-se o acumulado mensal da precipitação da estação Engenho. A relação entre precipitação e nível subterrâneo foi avaliada pelo coeficiente de correlação de Pearson (r), que varia de -1 a +1 (Pearson, 1895). Os valores utilizados para representar o comportamento do P03–Pz01 foram considerados com o sinal invertido por meio da multiplicação por -1, conforme o tratamento adotado para os dados. As correlações negativas foram interpretadas como o comportamento esperado entre precipitação e nível dinâmico.

Foram aplicadas defasagens temporais de 0 a 6 meses. O Lag 0 representa a relação sem defasagem, enquanto os demais lags representam intervalos entre a ocorrência da precipitação e a resposta observada no nível subterrâneo. Para cada período climático, foram calculados os coeficientes de Pearson e selecionada a correlação negativa de maior intensidade. O p-valor não foi utilizado como critério para escolha do lag, pois o objetivo foi identificar a defasagem de maior correspondência entre as séries.

Os dados foram subdivididos em períodos de La Niña, El Niño e neutralidade, com base no Oceanic Niño Index (ONI). A intensidade dos eventos foi considerada a partir da classificação histórica apresentada por Jan Null, do Golden Gate Weather Services. Foram avaliados os períodos: La Niña forte (jul/1999–jun/2000), La Niña fraca (jul/2000–jun/2001), neutro 1 (jul/2001–jun/2002), El Niño moderado (jul/2002–jun/2003), neutro 2 (jul/2003–jun/2004) e El Niño fraco (jul/2004–jul/2005).

Resultados e Discussões

Os coeficientes de correlação de Pearson apresentaram variações entre os diferentes lags e condições climáticas analisadas. Para a interpretação dos resultados, considerou-se que o nível dinâmico apresenta comportamento inverso à posição da água. Assim, o aumento da quantidade de água associado à precipitação tende a produzir redução do valor do nível dinâmico, sendo esperada uma relação negativa entre as duas variáveis.

Durante a La Niña forte, entre julho de 1999 e junho de 2000, foram observadas correlações negativas elevadas em todos os lags analisados. A correlação negativa de maior intensidade ocorreu no Lag 1, com r = -0,945, indicando maior correspondência entre precipitação e nível de água subterrânea com aproximadamente um mês de defasagem. Na La Niña fraca, entre julho de 2000 e junho de 2001, a maior correlação negativa também ocorreu no Lag 1, com r = -0,622. Embora menos intensa, a coincidência do Lag 1 nos dois eventos mostra comportamento semelhante quanto ao intervalo temporal de maior associação.

Nos períodos neutros, os resultados foram diferentes. No Normal 1, entre julho de 2001 e junho de 2002, a correlação negativa de maior intensidade ocorreu no Lag 2, com r = -0,582, indicando maior correspondência com aproximadamente dois meses de defasagem. No Normal 2, entre julho de 2003 e junho de 2004, a maior correlação negativa foi observada no Lag 1, com r = -0,491. Portanto, os dois períodos neutros não apresentaram o mesmo comportamento.

Durante o El Niño moderado, entre julho de 2002 e junho de 2003, a maior correlação negativa ocorreu no Lag 0, com r = -0,272. A intensidade foi menor do que a observada nos períodos de La Niña, e vários coeficientes dos lags seguintes passaram a apresentar sinal positivo. Como a análise adotou a correlação negativa como o sentido esperado da relação entre precipitação e nível dinâmico, esses valores positivos não foram selecionados para indicar a defasagem de maior correspondência.

No El Niño fraco, entre julho de 2004 e julho de 2005, foi observado comportamento diferente. A maior correlação negativa ocorreu no Lag 2, com r = -0,859, indicando elevada associação com aproximadamente dois meses de defasagem. Também foram encontrados valores negativos elevados no Lag 0 (r = -0,839) e no Lag 1 (r = -0,703).

A comparação geral mostrou que não houve uma única defasagem temporal para todas as condições climáticas. A La Niña forte e a La Niña fraca apresentaram Lag 1; o Normal 1, Lag 2; o El Niño moderado, Lag 0; o Normal 2, Lag 1; e o El Niño fraco,

Lag 2. O comportamento mais semelhante foi observado entre os dois períodos de La Niña, embora com intensidades distintas.

Essas diferenças mostram que a resposta do sistema subterrâneo não deve ser associada exclusivamente à classificação de El Niño, La Niña ou neutralidade. A quantidade de precipitação em cada período, sua distribuição ao longo dos meses e as características do próprio sistema aquífero também podem influenciar a resposta observada. Além disso, a Lagoa do Bonfim encontra-se no litoral oriental do Rio Grande do Norte, onde a precipitação também sofre influência da variabilidade do Atlântico Tropical e de sistemas atmosféricos regionais (Kayano; Andreoli, 2006; Reboita; Santos, 2014).

Os lags analisados representam defasagens temporais de maior associação estatística e não devem ser interpretados diretamente como o tempo exato que uma determinada parcela de água leva para alcançar o aquífero. A resposta observada pode ser influenciada pelo armazenamento já existente no solo e no aquífero, pelas condições de umidade anteriores à precipitação, pela descarga subterrânea, pela evapotranspiração e por possíveis retiradas de água na região.

Conclusão

O estudo analisou a relação entre a variabilidade da precipitação e o comportamento do nível de água subterrânea na região da Lagoa do Bonfim/RN, utilizando dados da estação Engenho e registros do P03–Pz01.

A aplicação do coeficiente de correlação de Pearson associada às defasagens temporais permitiu comparar o comportamento das duas variáveis em diferentes condições climáticas. Nos dois períodos de La Niña, a maior correlação negativa ocorreu no Lag 1, com r = -0,945 durante a La Niña forte e r = -0,622 durante a La Niña fraca. No primeiro período neutro, a maior correlação foi observada no Lag 2, com r = -0,582, enquanto no segundo período neutro ocorreu no Lag 1, com r = -0,491. No El Niño moderado, a maior correlação negativa ocorreu no Lag 0, com r = -0,272, e no El Niño fraco, no Lag 2, com r = -0,859.

Não foi identificado um único padrão de resposta para todas as condições climáticas analisadas. O comportamento mais semelhante ocorreu nos dois períodos de La Niña, que apresentaram maior associação no Lag 1. Entretanto, as diferenças observadas nos demais períodos mostram que a resposta do nível subterrâneo não depende apenas da classificação do ENOS, devendo-se considerar também a distribuição da precipitação, as condições anteriores do sistema, as características do aquífero Dunas/Barreiras e outros mecanismos climáticos regionais.

Os lags encontrados indicam períodos de maior associação estatística entre precipitação e nível subterrâneo, não devendo ser interpretados como medida direta do tempo físico de infiltração ou recarga. Os resultados contribuem para a compreensão da dinâmica hídrica da Lagoa do Bonfim e reforçam a importância da continuidade do

monitoramento para ampliar as séries disponíveis e permitir análises futuras mais detalhadas.

Referências

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. ARAÚJO, Paula Andressa Alves de. Imputação de dados horários de velocidade do vento no território continental do Brasil. Orientador: Cláudio Moisés Santos e Silva. 2023. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Meteorologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. BEZERRA, Allison Vicente Silva. Potencial risco de contaminação do sistema aquífero Dunas/Barreiras por atividades antrópicas em área de manancial no Nordeste Brasileiro. 2022. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. CUNNINGHAM, William L.; SCHALK, Charles W. Groundwater technical procedures of the U.S. Geological Survey. Reston: U.S. Geological Survey, 2011. (Techniques and Methods, book 1, chap. A1). DOI: 10.3133/tm1A1. DINIZ FILHO, José Braz; MACEDO, Luiz Gustavo Moraes de; MELO, José Geraldo de. Aspectos sobre a hidrogeologia e vulnerabilidade do aquífero Barreiras semi-confinado, a oeste da Lagoa do Bonfim – Nísia Floresta/RN. Águas Subterrâneas, 2015. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28249. Acesso em:16 ago. 2026. GOMES, Helber Barros; AMBRIZZI, Tércio; HERDIES, Dirceu Luís; HODGES, Kevin; PONTES DA SILVA, Bruce Francisco. Easterly Wave Disturbances over Northeast Brazil: An Observational Analysis. Advances in Meteorology, v. 2015, art. 176238, 2015. DOI: 10.1155/2015/176238. HEALY, Richard W.; COOK, Peter G. Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p. 91–109, 2002. DOI: 10.1007/s10040-001-0178-0. HIRATA, Ricardo; CONICELLI, Bruno P. Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 84, n. 2, p. 297–312, 2012. DOI: 10.1590/S0001-37652012005000037. HONAKER, James; KING, Gary; BLACKWELL, Matthew. Amelia II: A Program for Missing Data. Journal of Statistical Software, v. 45, n. 7, p. 1–47, 2011. DOI: 10.18637/jss.v045.i07. KAYANO, Mary T.; ANDREOLI, Rita V. Relationships between rainfall anomalies over northeastern Brazil and the El Niño–Southern Oscillation. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 111, D13101, 2006. DOI: 10.1029/2005JD006142. LUCENA, Leandson Roberto F. de; ROSA FILHO, Ernani Francisco da; HINDI, Eduardo Chemas. O fator estrutural atuante na conexão hidráulica subterrânea entre o sistema lacustre do Bonfim e a bacia do rio Pirangi, litoral leste do Rio Grande do Norte. Águas Subterrâneas, v. 16, n. 1, 2002. DOI: 10.14295/ras.v16i1.1302. MANOEL FILHO, João; CASTRO, Vera Lúcia Lopes de. Avaliação e explotação do aquífero Dunas-Barreiras na região do subsistema lacustre do Bonfim – RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002. Anais [...], 2002. MELO, José Geraldo de; FEITOSA, Edilton Carneiro; SILVA, Elvis Roberto da. Hidrogeologia da região do complexo lagunar do Bonfim/RN. Águas Subterrâneas, 2000. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24336. Acesso em: 16 ago. 2026. NULL, Jan. El Niño and La Niña Years and Intensities: Based on Oceanic Niño Index (ONI). Golden Gate Weather Services, [s. d.]. Disponível em: https://ggweather.com/enso/oni.htm. Acesso em: 16 ago. 2026. PEARSON, Karl. Note

on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents. Proceedings of the Royal Society of London, v. 58, p. 240–242, 1895. REBOITA, Michelle Simões; SANTOS, Isimar de Azevedo. Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no Norte e Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Climatologia, v. 15, 2014. DOI: 10.5380/abclima.v15i0.37686. RIO GRANDE DO NORTE. Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos – SERHID; Coordenadoria de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH. Relatório de Monitoramento do Sistema Lacustre do Bonfim: nível dinâmico dos poços e piezômetros do Sistema Lacustre do Bonfim (m). [s. d.]. RUBIN, Donald B. Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys. New York: Wiley, 1987. DOI: 10.1002/9780470316696. SONDAMAR. Poços piezométricos. [s. d.]. Disponível em: https://www.sondamar.com.br/sondagem2/12/pocos_piezometricos. Acesso em: 16 ago. 2026. XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). International Journal of Climatology, v. 42, n. 16, p. 8390–8404, 2022. DOI: 10.1002/joc.7731.

Anexos

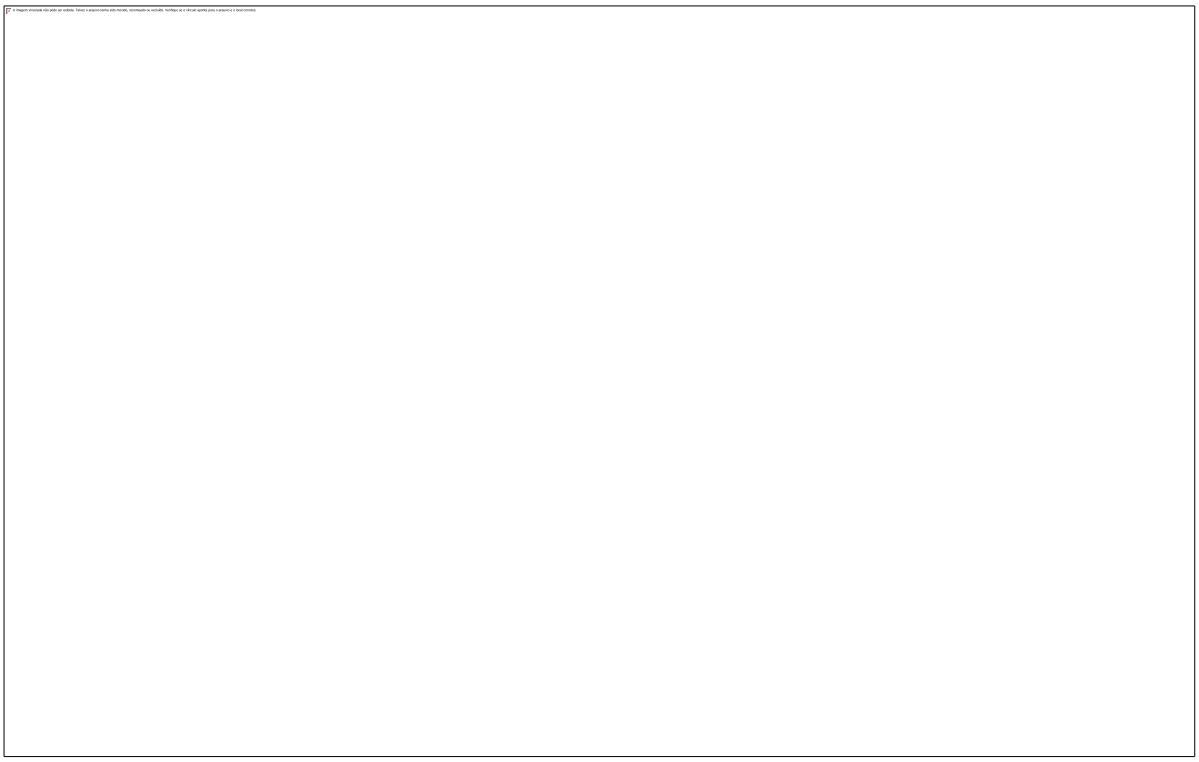


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Elaborado pela autora (2026).

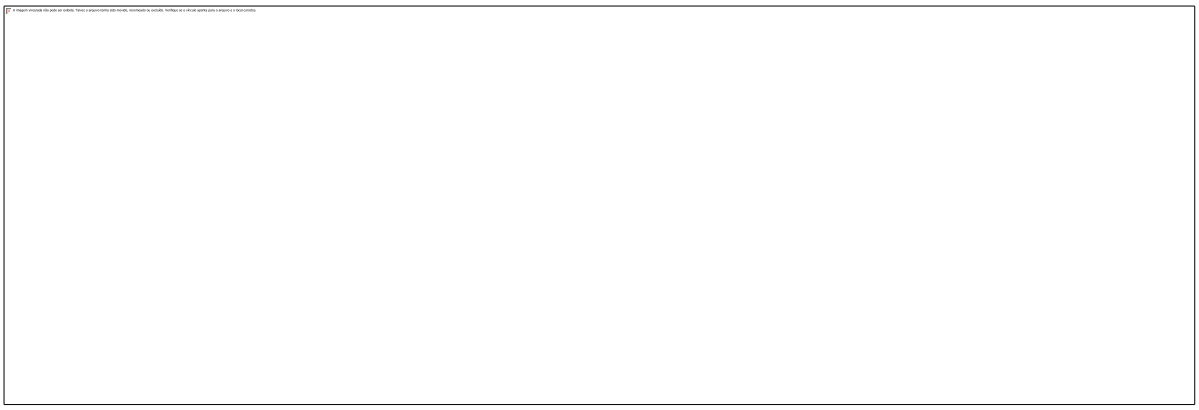


Tabela 1 – Classificação dos períodos climáticos utilizados na análise



Tabela 2 – Coeficientes de correlação de Pearson por condição climática e defasagem temporal

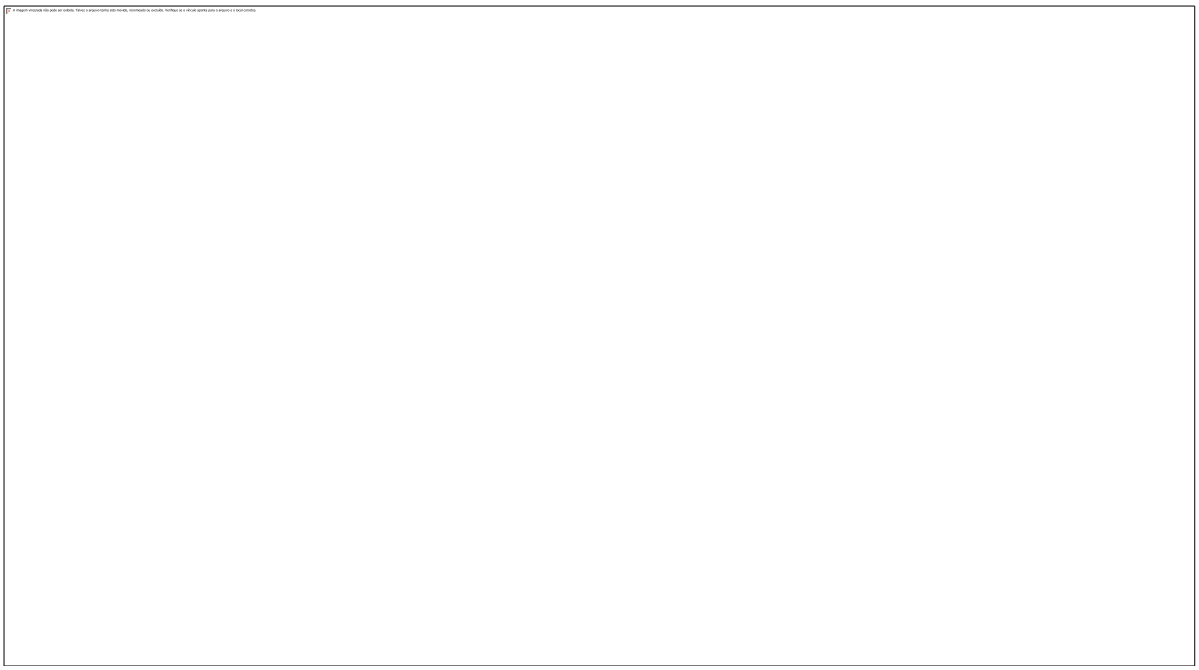


Figura 2 – Correlação de Pearson (r) por subgrupo climático e Lag (Jul/1999 – Jul/2005).

CÓDIGO: ET1413

AUTOR: ELBER KLEBERSON MARTINERI FERNANDES

ORIENTADOR: RUMMENIGGE RUDSON DANTAS

TÍTULO: Criação da versão multiusuário e multi-plataforma do jogo sério de Realidade virtual de treinamento de equilíbrio Virtualter

Resumo

Jogos sérios e tecnologias imersivas têm sido utilizados como apoio à reabilitação, mas sua aplicação exige considerar diferenças entre pacientes, engajamento e personalização. Este trabalho apresenta a evolução do Virtualter para uma versão multiusuário e multiplataforma, capaz de diferenciar a experiência conforme o usuário conectado. Paralelamente, foi desenvolvido o Apple Picking, aplicação experimental em Realidade Virtual que utiliza movimentos de alcance e extensão dos membros superiores como parte das mecânicas de jogo. A pesquisa combinou desenvolvimento tecnológico e revisão bibliográfica sobre reabilitação, personalização, Realidade Virtual e game design. Como resultado, foi estabelecida uma base para experiências personalizadas e para futura integração com diferentes dispositivos e interfaces. O Apple Picking também permitiu investigar a integração entre objetivos terapêuticos e mecânicas lúdicas. Como continuidade, pretende-se ampliar o sistema para Realidade Aumentada, dispositivos móveis e web, além de criar ferramentas específicas para fisioterapeutas e acompanhamento remoto.

Palavras-chave: Jogos Sérios; Realidade Virtual; Reabilitação; Saúde Digital.

TITLE: Development of a Multi-User and Multi-Platform Version of the Virtualter Virtual Reality Serious Game for Balance Training

Abstract

Serious games and immersive technologies have been used to support rehabilitation, but their application requires consideration of differences among patients, engagement, and personalization. This work presents the evolution of Virtualter into a multi-user and multi-platform version capable of adapting the experience according to the connected user. In parallel, Apple Picking was developed as an experimental Virtual Reality application that incorporates upper-limb reaching and extension movements into its game mechanics. The research combined technological development with a literature review on rehabilitation, personalization, Virtual Reality, and game design. As a result, a foundation was established for personalized experiences and future integration with different devices and interfaces. Apple Picking also enabled the investigation of the

integration between therapeutic goals and game mechanics. As future work, the system is intended to be expanded to Augmented Reality, mobile devices, and web platforms, in addition to the development of specific tools for physiotherapists and remote patient monitoring.

Keywords: Serious Games; Virtual Reality; Rehabilitation; Digital Health.

Introdução

A reabilitação motora pode envolver atividades repetitivas de longo prazo tornando o engajamento do paciente um desafio. Nesse contexto, jogos sérios vêm sendo investigados como ferramentas capazes de associar objetivos terapêuticos a experiências interativas [1], [2]. A Realidade Virtual (RV) amplia essas possibilidades ao incorporar movimentos corporais diretamente à interação e apresenta resultados promissores em diferentes contextos de reabilitação motora [3], [4]. Entretanto, a criação de uma experiência virtual não garante, por si só, uma atividade adequada ou envolvente. O desenvolvimento de jogos sérios para reabilitação exige integrar requisitos clínicos e princípios de game design [1], [5]. Além disso, pacientes apresentam capacidades e progressões distintas, reforçando a necessidade de personalização das atividades [6], [7]. O Virtualter está inserido nesse contexto como um sistema voltado ao treinamento e à reabilitação em ambientes virtuais. Este trabalho teve como objetivo contribuir para sua evolução para uma versão multiusuário e multiplataforma, permitindo diferenciar experiências conforme o usuário conectado. Paralelamente, foi desenvolvido o Apple Picking, aplicação experimental em RV voltada a movimentos de alcance e extensão dos membros superiores. A proposta investigou como movimentos relacionados à reabilitação podem ser incorporados diretamente às mecânicas e objetivos de um jogo [2], [5].

Metodologia

O trabalho foi conduzido como uma pesquisa aplicada de desenvolvimento tecnológico, combinando a evolução do Virtualter com uma pesquisa aprofundada sobre o tratamento para os usuários e uma revisão bibliográfica sobre jogos sérios, Realidade Virtual, personalização e reabilitação. Foram considerados trabalhos sobre integração entre requisitos clínicos e game design [1], [5], personalização de exercícios [6], [7] e tecnologias de captura de movimento aplicadas à reabilitação [9]. Inicialmente, buscou-se permitir que o Virtualter reconhecesse diferentes usuários e utilizasse essa informação para modificar a experiência apresentada. A estrutura foi planejada também considerando futura integração com diferentes dispositivos e interfaces, incluindo ferramentas destinadas a pacientes e profissionais. Como aplicação experimental da pesquisa, foi desenvolvido o Apple Picking em Unity 6 para o Meta Quest 3 e o Meta Quest 3S. A interação utiliza o hand tracking do sistema da Meta, permitindo que o usuário alcance objetos virtuais diretamente com as mãos. Para um melhor exercício foram definidos nove pontos de surgimento ao redor do jogador, com alcance parametrizável e possibilidade de utilização da aplicação com o usuário sentado ou em pé. Também foram implementados estímulos visuais e auditivos e alterações de dificuldade baseadas no tempo disponível para interação. Esses parâmetros permitem

adequar características da experiência sem depender apenas do aumento da velocidade dos movimentos [6], [7].

Resultados e Discussões

O desenvolvimento permitiu avançar o Virtualter para uma estrutura em que a experiência pode variar de acordo com o usuário conectado. Essa possibilidade é relevante para reabilitação, pois diferentes pacientes podem apresentar capacidades e necessidades distintas. Trabalhos anteriores também utilizam histórico, desempenho e características do usuário para personalizar exercícios e dificuldade [6], [7]. Outro resultado foi o desenvolvimento do Apple Picking. No protótipo, movimentos de alcance necessários à atividade motora foram incorporados à própria mecânica de colheita, aproximando objetivo terapêutico e objetivo de jogo. Essa estratégia está de acordo com propostas que defendem maior integração entre funções clínicas e elementos lúdicos [2], [5]. Os nove pontos de surgimento permitem variar espacialmente as regiões alcançadas pelo usuário, enquanto o hand tracking possibilita interação direta com os objetos virtuais. Tecnologias de rastreamento de movimento já vêm sendo utilizadas em diferentes aplicações de reabilitação de membros superiores [3], [9]. A dificuldade também pode ser modificada pelo tempo disponível para alcançar os objetos, permitindo adaptar o desafio sem exigir apenas movimentos mais rápidos. Essa abordagem se relaciona a sistemas de reabilitação adaptativos que modificam parâmetros conforme as capacidades ou desempenho do usuário [6], [7]. Os resultados apresentados correspondem ao desenvolvimento tecnológico do sistema e não constituem validação clínica do Apple Picking. Embora a literatura apresente resultados promissores para jogos sérios e RV em reabilitação [3], [4], estudos específicos com usuários ainda serão necessários. A expansão completa para RV, Realidade Aumentada, dispositivos móveis e web também permanece como trabalho futuro. Essa evolução poderá incluir uma interface específica para fisioterapeutas, destinada à configuração e acompanhamento das atividades, aproximando o projeto de cenários de telereabilitação [1], [8].

Conclusão

O trabalho permitiu avançar o Virtualter em direção a uma estrutura base para multiusuário, capaz de diferenciar experiências conforme o usuário conectado. A pesquisa também reforçou a importância da personalização e da integração entre requisitos terapêuticos e elementos de jogo, aspectos destacados na literatura sobre jogos sérios para reabilitação [1], [2], [5], [6]. O desenvolvimento do Apple Picking possibilitou experimentar essa integração por meio de hand tracking, diferentes regiões de alcance, dificuldade parametrizável e respostas visuais e auditivas. Entretanto, sua eficácia terapêutica ainda deverá ser avaliada por estudos específicos com usuários, para uma definição na escala SUS (System Usability Scale). Como continuidade, pretende-se ampliar o Virtualter para uma arquitetura híbrida e multiplataforma, integrando RV, Realidade Aumentada, dispositivos móveis e web. Também está prevista a criação de ferramentas voltadas aos fisioterapeutas, permitindo futuramente configuração, acompanhamento e aplicação do sistema em cenários de telereabilitação [8].

Referências

[1] AMENGUAL ALCOVER, E.; JAUME-I-CAPÓ, A.; MOYÀ-ALCOVER, B. PROGame: A process framework for serious game development for motor rehabilitation therapy. PLOS ONE, v. 13, n. 5, e0197383, 2018. DOI: 10.1371/journal.pone.0197383. [2] VIEIRA, C.; PAIS-VIEIRA, C. F. S.; NOVAIS, J.; PERROTTA, A. Serious Game Design and Clinical Improvement in Physical Rehabilitation: Systematic Review. JMIR Serious Games, v. 9, n. 3, e20066, 2021. DOI: 10.2196/20066. [3] PATSAKI, I.; DIMITRIADI, N.; DESPOTI, A.; TZoumi, D.; LEVENTAKIS, N.; ROUSSOU, G.; PAPATHANASIOU, A.; NANAS, S.; KARATZANOS, E. The effectiveness of immersive virtual reality in physical recovery of stroke patients: A systematic review. Frontiers in Systems Neuroscience, v. 16, 880447, 2022. DOI: 10.3389/fnsys.2022.880447. [4] DOUMAS, I.; EVERARD, G.; DEHEM, S.; LEJEUNE, T. Serious games for upper limb rehabilitation after stroke: a meta-analysis. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, v. 18, art. 100, 2021. DOI: 10.1186/s12984-021-00889-1. [5] ZHANG, C.; YU, S.; JI, J. CFI: a VR motor rehabilitation serious game design framework integrating rehabilitation function and game design principles with an upper limb case. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, v. 21, art. 113, 2024. DOI: 10.1186/s12984-024-01373-2. [6] GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, C. S.; TOLEDO-DELGADO, P. A.; MUÑOZ-CRUZ, V.; TORRES-CARRION, P. V. Serious games for rehabilitation: Gestural interaction in personalized gamified exercises through a recommender system. Journal of Biomedical Informatics, v. 97, 103266, 2019. DOI: 10.1016/j.jbi.2019.103266. [7] AFYOUNI, I.; MURAD, A.; EINEA, A. Adaptive Rehabilitation Bots in Serious Games. Sensors, v. 20, n. 24, 7037, 2020. DOI: 10.3390/s20247037. [8] SERON, P. et al. Effectiveness of Telerehabilitation in Physical Therapy: A Rapid Overview. Physical Therapy, v. 101, n. 6, pzab053, 2021. DOI: 10.1093/ptj/pzab053. [9] ALARCÓN-ALDANA, A. C.; CALLEJAS-CUERVO, M.; BO, A. P. L. Upper Limb Physical Rehabilitation Using Serious Videogames and Motion Capture Systems: A Systematic Review. Sensors, v. 20, n. 21, 5989, 2020. DOI: 10.3390/s20215989.

CÓDIGO: ET1469

AUTOR: MARIANA DE MELO VARELA BOHNKE

COAUTOR: VALDIR LUNA DA SILVA

COAUTOR: DIANA MOURA SILVA

COAUTOR: LEANDRO DE ALMEIDA

ORIENTADOR: LEONARDO ANDRADE DE ALMEIDA

TÍTULO: Simulador Didático do Método da Velocidade Radial: Uma Analogia Sonora para a Detecção de Exoplanetas via Efeito Doppler

Resumo

A descoberta do primeiro exoplaneta em torno de uma estrela da sequência principal, 51 Pegasi b, realizada em 1995 por Michel Mayor e Didier Queloz, revolucionou a Astrofísica Moderna e rendeu parte do prêmio Nobel de 2019 para os autores. Utilizando o método da velocidade radial, os pesquisadores abriram caminho para uma nova era da exploração espacial. Inspirado por tal conquista, o presente trabalho apresenta um experimento didático para a detecção planetária via Efeito Doppler, utilizando ondas sonoras como analogia às variações de frequência luminosa. O arranjo experimental é composto por uma estrutura giratória acoplada a um motor DC, contendo uma mini caixa de som (representando a estrela) e um objeto esférico (simulando o planeta). Para analisar a dinâmica do sistema, um programa foi desenvolvido para captar o movimento e medir, em tempo real, as variações da frequência sonora geradas pela mini caixa de som em translação. Os resultados obtidos demonstraram que o simulador reproduz de forma consistente o comportamento cíclico da velocidade radial, evidenciado tanto pelo deslocamento visual do espectro de cores entre o vermelho e o azul, quanto pela variação senoidal registrada no gráfico de velocidade em função do tempo. Portanto, o experimento valida a eficácia da analogia sonora como ferramenta para tornar tangível um fenômeno de difícil percepção da Astronomia e constitui um recurso didático acessível e replicável para o ensino de Astronomia na Educação Básica.

Palavras-chave: Exoplanetas; Velocidade Radial; Efeito Doppler; Ensino básico

TITLE: Acoustic Analogy in Astrophysics Education: A Radial Velocity Simulator for Basic Education

Abstract

The discovery of the first exoplanet orbiting a main-sequence star, 51 Pegasi b, made in 1995 by Michel Mayor and Didier Queloz, revolutionized Modern Astrophysics and earned the authors part of the 2019 Nobel Prize. Using the radial velocity method, the researchers paved the way for a new era of space exploration. Inspired by this achievement, this work presents a didactic experiment for planetary detection via the Doppler Effect, employing sound waves as an analogy to variations in light frequency. The experimental setup consists of a rotating structure coupled to a DC motor, containing a mini speaker (representing the star) and a spherical object (simulating the planet). A program was developed to capture the motion and measure, in real time, the sound frequency variations generated by the speaker in translation. The results showed that the simulator consistently reproduces the cyclical behavior of radial velocity, evidenced both by the visual shift of the color spectrum between red and blue and by the sinusoidal variation recorded in the velocity-versus-time graph. The experiment validates the sound analogy as a tool for making an astronomical phenomenon that is difficult to perceive more tangible, constituting an accessible and replicable educational resource for teaching Astronomy in Basic Education.

Keywords: Exoplanets; Radial Velocity; Doppler Effect; Basic Education

Introdução

O poder transformador do método da velocidade radial na Astronomia foi mundialmente reconhecido com o Prêmio Nobel de Física de 2019, concedido a Michel Mayor e Didier Queloz. Em 1995, utilizando essa técnica fundamentada no Efeito Doppler, os pesquisadores realizaram a descoberta pioneira de 51 Pegasi b, o primeiro exoplaneta em torno de uma estrela da sequência principal [1]. Esse feito revolucionou a Astrofísica Moderna e inaugurou uma nova era na exploração espacial.

Atualmente, a busca por exoplanetas figura entre os campos mais dinâmicos da ciência, tendo a velocidade radial como um de seus métodos mais bem-sucedidos. A técnica baseia-se na alteração aparente da frequência de uma onda — sonora ou eletromagnética — gerada pelo movimento relativo entre emissor e observador. Aplicado à luz estelar, o efeito Doppler revela sutis oscilações no centro de massa do sistema, induzidas pela atração gravitacional de corpos em órbita. Foi exatamente a precisão na leitura dessas variações que viabilizou a descoberta de 51 Pegasi b e garantiu o Nobel aos seus autores.

O efeito Doppler ocorre porque as ondas emitidas por uma fonte se propagam de forma isotrópica, formando frentes de onda concêntricas que se distanciam da fonte ao longo do tempo. Quando a fonte está em movimento, as frentes emitidas no sentido do deslocamento se comprimem, reduzindo o comprimento de onda e aumentando a frequência percebida; no sentido oposto, ocorre o inverso. Esse comportamento, válido tanto para ondas sonoras quanto eletromagnéticas, fundamenta a importância do fenômeno em diversas áreas da ciência, da Acústica à Astrofísica. Na Astronomia, a velocidade radial de corpos celestes, obtida via desvio espectral da luz, é expressa por:$vr/c = \Delta\lambda/\lambda 0$ (1) em que vr é a velocidade radial do objeto, c é a velocidade da luz no vácuo, $\Delta\lambda$ é a variação entre o comprimento de onda observado e o de repouso, e $\lambda 0$ é o comprimento de onda de referência emitido pela fonte em repouso. É essa mesma

lógica, adaptada ao domínio sonoro, que fundamenta o simulador desenvolvido neste trabalho.

Apesar de sua relevância científica, a aplicação do efeito Doppler à velocidade radial estelar frequentemente representa um desafio didático, devido à dificuldade de visualizar conceitos como a alteração no comprimento de onda e o movimento relativo das estrelas. Esse obstáculo é corroborado por Fernandes et al. (2016) [2], que destacam a carência de verificação experimental do fenômeno nas escolas, já que sua observação na luz exige instrumentação especializada. Nesse cenário, a analogia com o som — perceptível na mudança de tom de uma sirene em movimento — surge como via pedagógica acessível para tornar tangível o efeito Doppler observado em corpos celestes, princípio norteador deste trabalho.

O trabalho tem, portanto, como objetivo o desenvolvimento de um simulador físico e interativo que reproduza, por meio do som, a lógica do efeito Doppler "da luz" aplicada à determinação da velocidade radial de estrelas, abrangendo desde a fundamentação teórica — como o funcionamento de instrumentos como o espectrógrafo — até a modelagem e fabricação de seus componentes mecânicos.

Vale salientar que o desenvolvimento deste simulador dialoga diretamente com os diagnósticos do Plano Nacional de Astronomia (PNA) [3], que aponta a carência, no Brasil, de materiais didáticos contextualizados para o Ensino de Astronomia e recomenda a criação de objetos educacionais acessíveis. É nesse cenário que o simulador se insere: ao traduzir, por meio do som, o princípio do efeito Doppler aplicado à velocidade radial estelar, o projeto oferece um recurso didático concreto e replicável, alinhado à democratização do conhecimento científico defendida pelo PNA. Ressalta-se que este trabalho está inserido nos ODS 04 e 09.

Metodologia

A metodologia deste trabalho pode ser dividida em 2 partes: 1 - Construção do Aparato Mecânico; 2 - Implementação do dispositivo de emissão e recepção do sinal sonoro e criação do código de interpretação do sinal sonoro.

1 - Construção do Aparato Mecânico:
Para tornar clara a montagem prática do experimento, esta seção apresenta o projeto do simulador tanto do ponto de vista mecânico quanto elétrico, detalhando a função de cada componente na estrutura.

A construção do simulador físico de velocidade radial teve como ponto de partida a montagem de uma estrutura de suporte giratória, capaz de reproduzir o movimento orbital de um corpo celeste em torno de outro. Para isso, utilizou-se uma placa de madeira (1), fixada sobre pés de mesa pequenos (2), que serviu como base de sustentação de todo o sistema. No centro dessa placa de madeira foi feito um furo (3), no qual se encaixou um rotor (4) acoplado a um motor (5) posicionado abaixo da estrutura que funciona à base de uma bateria (6). Esse conjunto motor-rotor foi conectado a uma peça de alumínio giratória (7), fixada ao centro da placa por meio de parafusos, que permitiu transformar a rotação do motor em um movimento circular da barra sobre a base.

Sobre essa barra giratória, próximo ao centro de massa do sistema de modo a manter o equilíbrio da estrutura durante a rotação, foi posicionado um domo contendo em seu interior uma mini caixa de som sem fio (8), responsável por simular a estrela e emitir a fonte sonora do experimento. Na extremidade oposta da barra, foi fixada uma esfera plástica (9), representando o planeta em órbita. Dessa forma, ao acionar o motor, a barra passa a girar em torno do eixo central, fazendo com que a caixa de som (estrela) se movimente alternadamente se aproximando e se afastando de um ponto fixo de observação reproduzindo, em escala reduzida, o movimento orbital que gera a variação de velocidade radial nos sistemas estelares reais.

2 - Medição e Análise do Efeito Doppler Sonoro:
Para a captação e análise do efeito Doppler gerado pelo simulador, foi utilizado um microfone e um programa desenvolvido pelo Dr. Leandro de Almeida, co-autor do trabalho, capaz de coletar em tempo real a frequência do som emitida pela caixa de som em movimento. A caixa de som foi configurada para emitir um som constante na frequência de 9 kHz. À medida que o motor é acionado e a barra entra em rotação, o programa capta as variações de frequência causadas pelo movimento da fonte sonora e as converte visualmente em duas representações simultâneas:
Um espectro de cores, análogo ao espectro eletromagnético, no qual a frequência captada é traduzida em uma posição ao longo do gradiente do vermelho ao azul deslocando-se para o azul quando a fonte se aproxima do observador (aumento de frequência) e para o vermelho quando se afasta (diminuição de frequência), reproduzindo visualmente o blueshift e o redshift observados na luz das estrelas, representado na Figura 3. Um gráfico de velocidade radial em tempo real, exibindo as oscilações da velocidade relativa da fonte ao longo do tempo, na forma de picos periódicos correspondentes a cada ciclo de aproximação e afastamento da caixa de som durante a rotação da barra, também apresentado na Figura 3.

Dessa forma, o simulador permite observar de maneira concreta e didática, através do som, o mesmo princípio físico utilizado por astrônomos para detectar e caracterizar exoplanetas por meio da variação da velocidade radial estelar medida na luz. No seguinte link, é possível ter acesso aos códigos da captura e análise do som, as frequências utilizadas, uma descrição resumida do simulador, como também de um vídeo mostrando em detalhes o funcionamento do simulador https://github.com/Titan-UFRN/velocidade-radial.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos com o simulador confirmaram sua capacidade de reproduzir, de forma consistente e didaticamente acessível, o comportamento cíclico da velocidade radial observado em sistemas estelares reais. Ao acionar o motor e colocar a barra giratória em rotação constante, o programa de captação registrou as variações de frequência do som emitido pela mini caixa de som, evidenciando de maneira clara os dois efeitos esperados: o deslocamento para o azul (blueshift) durante a aproximação da fonte ao ponto de observação, e o deslocamento para o vermelho (redshift) durante seu afastamento. Essa dinâmica ficou evidenciada por meio de duas representações simultâneas geradas pelo programa (Figura 3).

Na primeira, o espectro de cores demonstrou uma transição contínua entre as tonalidades azul e vermelha, acompanhando fielmente o movimento orbital simulado pela barra. Na segunda, o gráfico de velocidade radial em função do tempo revelou um padrão oscilatório regular, com máximos e mínimos alternados que se repetiam a cada volta completa da barra — refletindo o movimento de vaivém da caixa de som em relação ao observador. A regularidade desse padrão indica que o sistema mecânico manteve uma rotação estável ao longo das medições, o que se refletiu na consistência dos dados coletados.A correspondência entre o comportamento observado no simulador e o fenômeno real de velocidade radial estelar reforça a validade da analogia sonora como estratégia pedagógica.

Enquanto a detecção do efeito Doppler na luz estelar depende de equipamentos de alta precisão, sua versão sonora é perceptível de forma direta, tanto pela variação audível do tom quanto pela visualização gráfica em tempo real, tornando tangível um conceito que, segundo Fernandes et al. (2016) [2], costuma representar um obstáculo didático significativo no ensino de Astronomia.

Do ponto de vista mecânico, a estrutura giratória mostrou-se estável e replicável, com o conjunto motor-rotor sustentando uma rotação uniforme sem comprometer o equilíbrio do sistema, mesmo com a massa adicional do domo e da esfera representando a estrela e o planeta. Isso indica que o simulador pode ser reproduzido em outros contextos educacionais com materiais de baixo custo e acessíveis, sem necessidade de instrumentação sofisticada.

Por fim, os resultados sugerem que o simulador cumpre seu objetivo de traduzir, por meio de uma analogia sensorial acessível, um princípio físico central da Astrofísica moderna. Essa abordagem dialoga diretamente com as recomendações do Plano Nacional de Astronomia [3], ao oferecer um recurso didático concreto, replicável e alinhado à democratização do conhecimento científico, com potencial de aplicação tanto em salas de aula da Educação Básica quanto em atividades de extensão e divulgação científica.

Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um simulador físico capaz de reproduzir, por meio do som, o princípio do efeito Doppler aplicado à velocidade radial estelar, oferecendo uma alternativa didática concreta e acessível para a compreensão de um dos métodos mais relevantes da Astronomia Moderna na detecção de exoplanetas. A partir da fundamentação teórica estudada, desde os princípios ondulatórios do efeito Doppler até sua aplicação relativística à luz, foi possível construir um protótipo funcional que traduz, de forma sensorial e intuitiva, um fenômeno que, na prática astronômica, só pode ser observado indiretamente por meio de instrumentos especializados como o espectrógrafo.

A escolha de utilizar o som como analogia à luz se mostrou uma estratégia pedagógica eficaz, corroborada pela literatura de ensino de física, que já demonstrou a viabilidade de experimentos de baixo custo envolvendo o efeito Doppler sonoro em ambientes escolares carentes de laboratórios equipados. Ao integrar componentes simples e de fácil acesso como o motor DC, o sistema giratório e a caixa de som posicionada em um

domo impresso em 3D, o simulador conseguiu reproduzir com clareza o comportamento cíclico da velocidade radial, evidenciado tanto no deslocamento do espectro de cores entre o vermelho e o azul, quanto no gráfico de variação de frequência gerado em tempo real durante os testes.

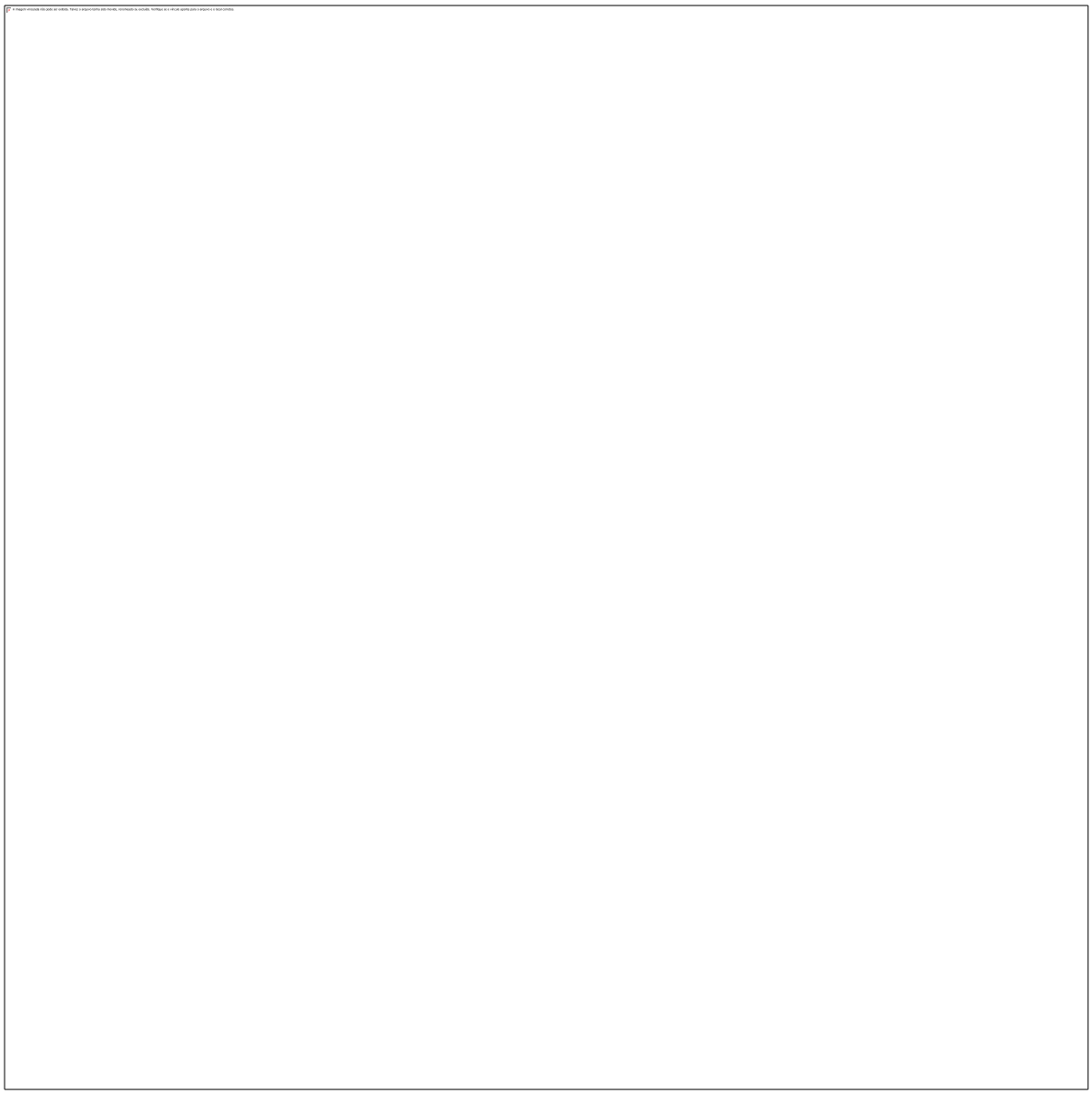
Do ponto de vista educacional, o projeto está alinhado às recomendações do Plano Nacional de Astronomia, que aponta a carência de materiais didáticos contextualizados e a necessidade de recursos que aproximem o público não especializado de temas astronômicos complexos. Nesse sentido, o simulador desenvolvido não se limita a uma demonstração técnica, mas se configura como uma ferramenta de divulgação científica e educacional.

Por fim, a experiência de desenvolvimento deste projeto proporcionou um aprendizado abrangente, que envolveu desde a pesquisa teórica sobre efeito Doppler, relatividade e espectroscopia estelar, até etapas práticas de modelagem 3D, montagem eletromecânica e produção de conteúdo audiovisual para divulgação científica. Esse conjunto de atividades contribuiu significativamente para a formação acadêmica, articulando teoria e prática de maneira integrada e reforçando a relevância de projetos de iniciação tecnológica como espaço de aprendizado interdisciplinar e de aproximação entre a universidade e a sociedade.

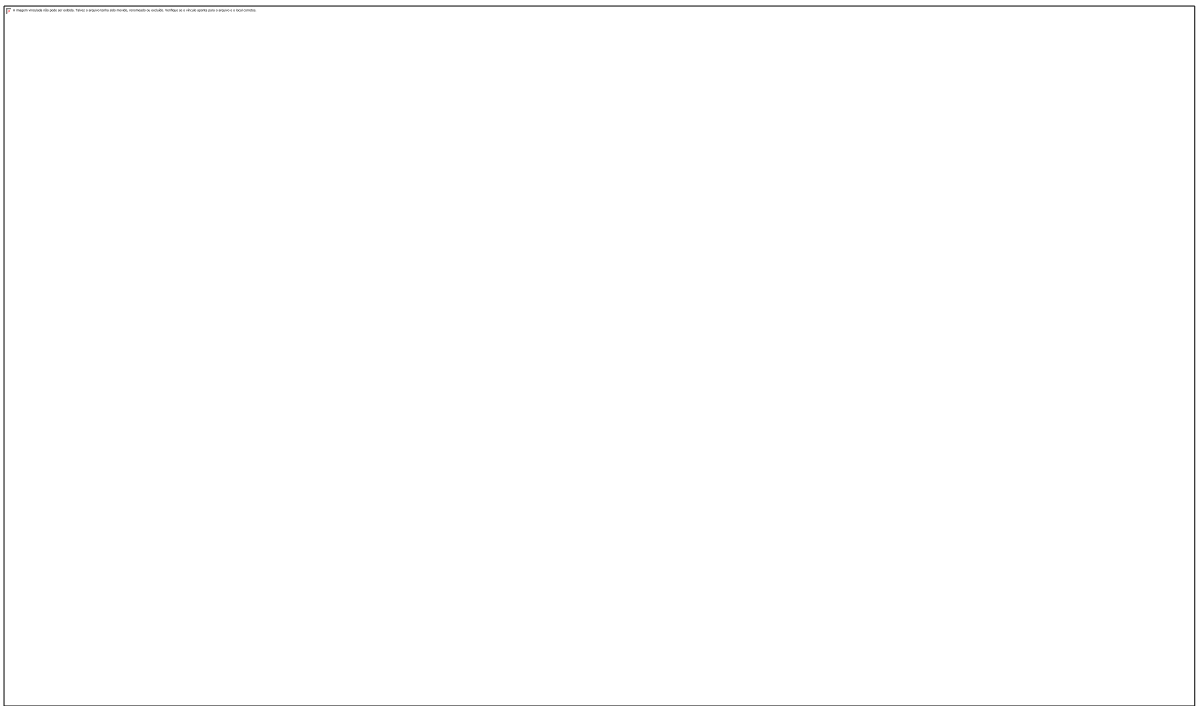
Referências

[1] MAYOR, M.; QUELOZ, D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. Nature, v. 378, p. 355–359, 1995. DOI: https://doi.org/10.1038/378355a0.
[2] FERNANDES, A. C. P.; AULER, L. T. S.; HUGUENIN, J. A. O.; BALTHAZAR, W. F. Efeito Doppler com tablet e smartphone. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 38, n. 3, e3504, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0006.
[3] SOCIEDADE ASTRONÔMICA BRASILEIRA. Plano Nacional de Astronomia (PNA). 2025.

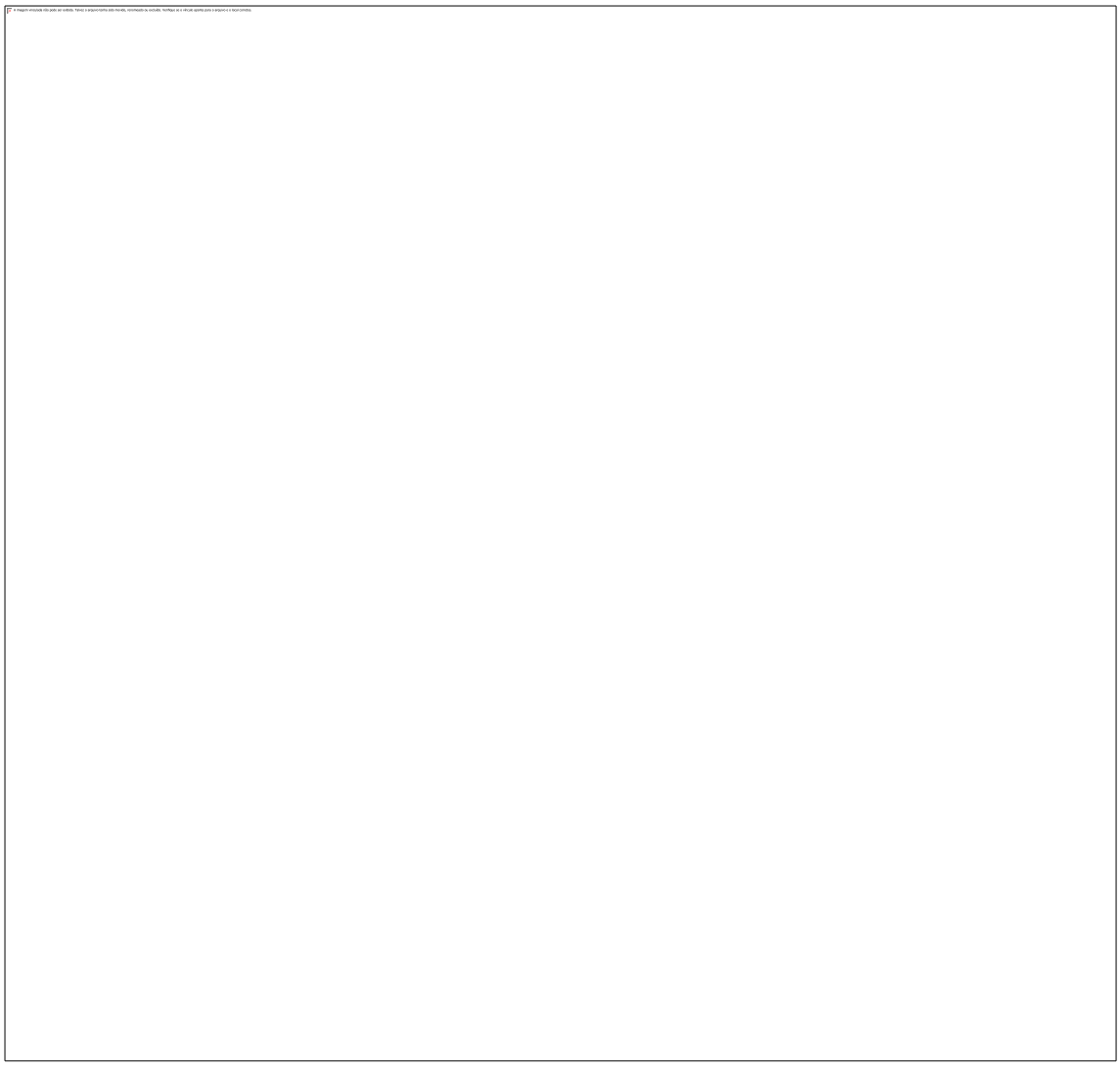
Anexos



(a) montagem completa, com domo e planeta nas extremidades da barra; (b) placa de madeira (1) e furo central (3) com rotor (4) encaixado; (c) acoplamento entre motor (5) e rotor (4); (d) domo impresso em 3D com LEDs acesos, representando a estrela (8).



(a) Conjunto elétrico isolado, composto pela bateria (6), pelo motor (5), pelo rotor (4) e pela engrenagem de transmissão.



(b) diagrama esquemático do circuito elétrico responsável pelo acionamento do motor, com a bateria de 6V (BAT2) conectada ao motor (M2).



Interface do programa de captação do Efeito Doppler sonoro: espectro de cores (superior), traduzindo a frequência em gradiente vermelho-azul, e gráfico de velocidade radial (inferior), registrando os ciclos de aproximação e afastamento da fonte.

CÓDIGO: ET1491

AUTOR: ANA BEATRIZ SANTOS FERREIRA

COAUTOR: LEANDRO DE ALMEIDA

ORIENTADOR: LEONARDO ANDRADE DE ALMEIDA

TÍTULO: Simulador de microlentes gravitacionais usando óptica clássica

Resumo

As microlentes gravitacionais foram previstas por Einstein em 1915, na Teoria da Relatividade Geral, e são atualmente amplamente utilizadas como técnica observacional na detecção de exoplanetas e objetos massivos que não emitem luz própria. Apesar de sua importância científica e tecnológica, sua compreensão é complexa para o público leigo por não ser um tema popular ou amplamente ensinado nas escolas e pela impossibilidade de observar diretamente as imagens formadas. Neste trabalho, propomos um simulador de microlentes gravitacionais baseado em óptica clássica, capaz de representar de forma visual e interativa o desvio da luz de um objeto distante por uma lente massiva alinhada entre a fonte e o observador. O simulador integra componentes ópticos, mecânicos e eletrônicos, incluindo fontes de luz, lentes geométricas, peças impressas em 3D personalizadas, LDR, motor e Arduino Uno, permitindo medir a variação da intensidade luminosa conforme o alinhamento do sistema. Os dados são exibidos em tempo real em um notebook, com curvas de luz simuladas análogas às de eventos reais e imagens simuladas de como seria o evento de microlente observado in situ. O experimento integrará o acervo didático do programa de extensão Cometa Nordestino, contribuindo para a divulgação da Astronomia e da Astronáutica em escolas públicas do Brasil, como também será proposto como um aparato didático para otimizar o processo de ensino-aprendizagem na educação básica.

Palavras-chave: icrolentes gravitacionais. Óptica clássica. Lupas Cósmicas. Exoplaneta

TITLE: Gravitational Microlensing Simulator Using Classical Optics

Abstract

Gravitational microlensing was predicted by Einstein in 1915 in the Theory of General Relativity and is widely used today as an observational technique to detect exoplanets and massive objects that do not emit their own light. Despite its scientific and technological importance, it is difficult for the general public to understand because it is

not widely known or taught in schools and because the images formed cannot be directly observed. In this work, we propose a gravitational microlensing simulator based on classical optics that visually and interactively represents the deflection of light from a distant object by a massive lens aligned between the source and observer. The simulator integrates optical, mechanical, and electronic components, including light sources, geometric lenses, custom 3D-printed parts, an LDR, a motor, and an Arduino Uno, enabling measurement of light-intensity variations according to system alignment. Data are displayed in real time on a notebook, with simulated light curves analogous to real events and simulated images of how a microlensing event would appear in situ. The experiment will be incorporated into the educational collection of the Cometa Nordestino extension program, contributing to Astronomy and Astronautics outreach in public schools in Brazil and being proposed as a didactic apparatus to optimize teaching and learning in basic education.

Keywords: Gravitational microlensing. Classical optics. Exoplanets.

Introdução

As microlentes gravitacionais, previstas pela Relatividade Geral de Albert Einstein [1], são eventos fascinantes da Astrofísica, que se tornaram uma ferramenta poderosa na busca por exoplanetas. O conceito por trás da microlente gravitacional é que objetos massivos curvam o espaço-tempo ao seu redor. Quando a luz de uma estrela distante (a fonte) passa perto de um objeto massivo mais próximo (a lente), a gravidade da lente desvia a luz. Por um período de tempo, esse desvio da luz faz com que a estrela de fundo pareça mais brilhante para um observador na Terra. É como se a lente agisse como uma lupa cósmica de maneira análoga.

Em um evento de microlente, o alinhamento entre a fonte, a lente e o observador provoca um aumento temporário do brilho da fonte, produzindo uma alteração característica na curva de luz. Quando a estrela lente possui um planeta, a presença desse corpo pode provocar uma pequena anomalia na curva, permitindo aos astrônomos inferir a existência e algumas propriedades do exoplaneta [2].

A busca por outros mundos possui relevância histórica e científica. Desde o século XVI, pensadores como Giordano Bruno já defendiam a existência de inúmeros mundos além do nosso. Atualmente, técnicas como a microlente gravitacional permitem investigar sistemas planetários distantes e ampliar o conhecimento sobre a diversidade de objetos existentes no Universo.

Apesar de sua importância, a compreensão das microlentes gravitacionais pode ser desafiadora para o público não especializado por envolver conceitos abstratos e fenômenos que não podem ser observados diretamente. Nesse contexto, a utilização de um experimento baseado em princípios de óptica clássica pode contribuir para tornar

esses conceitos mais acessíveis, permitindo representar visualmente o desvio e a ampliação da luz, bem como a amplificação do brilho da estrela de fundo na curva de luz.

A proposta também apresenta relevância educacional por aproximar conhecimentos de Astronomia, Física, Matemática e tecnologia por meio da experimentação e da análise de dados. Essa abordagem está alinhada à Base Nacional Comum Curricular (BNCC), especialmente às habilidades EM13CNT301 e EM13CNT302, relacionadas à investigação científica, utilização de instrumentos de medição, análise de dados experimentais e comunicação de resultados por meio de diferentes linguagens e recursos tecnológicos.

Neste trabalho, propomos o desenvolvimento de um experimento que simula eventos de microlente gravitacional utilizando óptica clássica, buscando apresentar de forma didática como essa técnica pode ser empregada na detecção de exoplanetas e no estudo de outros objetos astronômicos. A proposta será integrada às atividades do programa de extensão Cometa Nordestino, contribuindo para a divulgação científica e para a aproximação de estudantes de escolas públicas com a Astronomia e a Astrofísica.

Metodologia

Para a execução dos objetivos deste trabalho, foram realizadas as seguintes etapas:

(I) Confecção das lentes.

Foram produzidas lentes geométricas com moldes e suportes projetados pelo coorientador Leandro de Almeida usando impressão 3D na UFRN . Para a confecção no programa, os moldes utilizaram três camadas de parede, cinco camadas nas superfícies superior e inferior, 15% de preenchimento e 0,16 mm de altura de camada, enquanto os suportes utilizaram 20% e 0,20 mm.

Para criar uma superfície uniforme, utilizou-se acrílico transparente de 1 mm para contornar o molde da lente. Para tanto, o acrílico foi cortado nas dimensões do suporte, fixado com resina UV, aquecido com soprador térmico e pressionado gradualmente com ferramenta de ponta arredondada até adquirir a geometria do molde.

Em seguida, foi preparada uma mistura de resina epóxi cristal e catalisador na proporção de 50/50, inserida lentamente na cavidade formada pelo acrílico. As bolhas de ar foram removidas cuidadosamente com o soprador térmico e, após o preenchimento, a resina permaneceu em cura por aproximadamente 24 horas. Após a cura, a lente foi retirada do molde, mantida no suporte previamente confeccionado e utilizado no sistema de simulação de microlentes gravitacionais. Todo o processo da confecção das lentes é apresentado na Figura 1. Na Figura 2 apresentamos duas lentes, uma para um único objeto e outra para dois objetos.

(II) Projeto mecânico do trilho.

O projeto mecânico foi desenvolvido para permitir o deslocamento linear e controlado da lente, garantindo estabilidade e posicionamento ao longo do percurso. O sistema é composto por uma base de sustentação, haste roscada, barra lisa, rolamentos, porca, suporte móvel, motor e sensores de fim de curso (Figura 3).

A base de madeira foi utilizada para fixar e alinhar o conjunto mecânico, sendo o trilho parafusado à estrutura. A movimentação é realizada por uma haste roscada, acoplada ao motor nema 17 em uma extremidade e apoiada por um rolamento na extremidade oposta, foi desenvolvido dois suportes para segurar as barras (Figura 3). A rotação da haste é convertida em movimento linear por meio de uma porca fixada ao suporte móvel da lente. O guiamento é realizado por uma barra lisa com rolamentos lineares, responsáveis por reduzir o atrito e manter o alinhamento durante o deslocamento. Nas extremidades, elementos de suporte mantém a haste e a barra posicionadas e integradas ao motor. Sensores de fim de curso foram instalados para definir os limites do percurso e evitar que o suporte ultrapasse as posições estabelecidas. Assim, a integração dos componentes resultou em um sistema compacto e estável, permitindo o deslocamento controlado da lente.

(III) Projeto elétrico.

O projeto elétrico foi desenvolvido para integrar a alimentação, o controle, o acionamento do motor e a aquisição dos sinais dos sensores. O sistema utiliza um Arduino UNO R3 como unidade de controle, um driver A4988 para acionamento do motor de passo, dois sensores de fim de curso, um botão de comando e um sensor LDR. A implementação em placa de circuito impresso (PCI) foi adotada para organizar as conexões, reduzir a quantidade de fios e facilitar a montagem e replicação do circuito (Figura 4). O motor e o driver A4988 são alimentados por uma fonte de 12 V, enquanto

o Arduino é alimentado pela porta USB do computador. O Arduino envia os sinais STEP e DIR ao A4988, que controla os passos e o sentido de rotação do motor. O botão foi conectado a uma entrada digital do Arduino para permitir o comando manual do sistema. Dois sensores de fim de curso foram instalados nas extremidades do percurso e conectados às entradas digitais, permitindo identificar os limites de movimentação e interromper o acionamento do motor ao atingir essas posições. Para a detecção da intensidade luminosa, foi utilizado um LDR associado a um resistor de 10 kΩ, formando um divisor de tensão conectado a uma entrada analógica do Arduino. A variação da resistência do LDR com a incidência de luz produz alterações na tensão lida pelo microcontrolador, permitindo o monitoramento da luminosidade. O esquema elétrico é apresentado na Figura 5. Após a definição do circuito, foi desenvolvido o layout da PCI, organizando os componentes e as conexões entre o Arduino, o driver, a alimentação e os sensores, de modo a facilitar a montagem e a integração do sistema (Figura 6).

(III.I) Movimento do trilho.

O movimento do trilho foi realizado por meio de um motor de passo NEMA 17 acionado pelo driver A4988 e controlado pelo Arduino UNO R3. O motor transmite a rotação à haste roscada, convertendo-a em deslocamento linear do suporte da lente. O controle foi programado para permitir o acionamento por botão e a interrupção do movimento durante o percurso. Os sensores de fim de curso determinam os limites do deslocamento, interrompendo o motor quando o suporte que segura a lente no trilho atinge as extremidades.

(III.II) Coleta de dados e interface com o notebook.

A coleta de dados foi realizada utilizando um sensor LDR conectado à entrada analógica do Arduino por meio de um divisor de tensão com resistor de 10 kΩ. A comunicação entre o Arduino UNO R3 e o notebook foi realizada por meio da conexão USB. Durante o deslocamento da lente, o sensor registra as variações da intensidade luminosa resultantes da alteração do alinhamento entre a fonte de luz, a lente e o sensor. Os valores obtidos são enviados ao computador por comunicação serial, permitindo acompanhar a variação da luminosidade e construir a curva de luz correspondente ao movimento do sistema.

Todos os passos de montagem do aparato se encontram no repositório público no GitHub (https://github.com/Bibiaferreiraa/simulador-microlentes-gravitacionais).

Resultados e Discussões

O desenvolvimento do protótipo resultou na integração dos sistemas óptico, mecânico e eletrônico em um único aparato experimental. O sistema mecânico possibilitou o deslocamento controlado da lente ao longo do trilho, enquanto o Arduino realizou o controle do motor, o monitoramento dos sensores de fim de curso e a aquisição dos sinais do LDR.

Durante a movimentação, foi possível observar a mudança da intensidade luminosa registrada pelo LDR conforme a posição da lente variava em relação à fonte de luz e ao sensor. Essa variação permite representar experimentalmente o comportamento de uma curva de luz, estabelecendo uma analogia com os eventos de microlente gravitacional estudados na Astronomia.

A utilização do motor de passo possibilitou controlar o deslocamento da lente de maneira automatizada, enquanto os sensores de fim de curso contribuíram para limitar o percurso e aumentar a segurança do sistema. A implementação do circuito em PCI também proporcionou maior organização dos componentes e das conexões, favorecendo a montagem e a reprodução do protótipo.

A visualização dos dados no notebook permitiu acompanhar o comportamento do sinal em tempo real, tornando possível relacionar a movimentação da lente com a variação da intensidade luminosa. Dessa forma, o protótipo apresentou potencial para representar de maneira experimental e didática um fenômeno que, em sua ocorrência no espaço, não pode ser observado diretamente pelo observador na Terra.

Os resultados obtidos até esta etapa demonstram a viabilidade da utilização de princípios de óptica clássica para a construção de um simulador de microlentes gravitacionais, integrando conceitos de Física, Astronomia, Eletrônica, Mecânica e Programação. O sistema desenvolvido poderá ainda ser aprimorado por meio da realização de novos tipos de lentes gravitacionais, e.g. sistema triplos, sistemas planetários com exoluas, etc, e da análise quantitativa das curvas obtidas.

Conclusão

Este projeto utiliza princípios de óptica clássica para desenvolver um simulador de microlentes gravitacionais com uma abordagem mais didática para o público leigo. O experimento busca representar de forma visual e interativa a variação da luz durante um evento de microlente gravitacional, permitindo compreender as curvas de luz associadas a esses eventos e sua utilização na detecção de exoplanetas e outros objetos que não emitem luz própria. Nesse contexto, o simulador busca contribuir para a compreensão de uma técnica utilizada na Astronomia, aproximando conceitos de Astrofísica de estudantes por meio de uma experiência visual e experimental.

Ao ser incorporado às atividades do programa de extensão Cometa Nordestino, o projeto poderá contribuir para a divulgação científica em escolas públicas, incentivando o interesse pela Astronomia, pela Astrofísica e pelas áreas de ciência e tecnologia. Além disso, visando favorecer a reprodutibilidade e a disseminação da proposta, foram disponibilizados em repositório público no GitHub os procedimentos, materiais e etapas necessárias para a confecção das lentes e a construção do aparato experimental, permitindo que o projeto seja consultado e reproduzido por outros estudantes e instituições: https://github.com/Bibiaferreiraa/simulador-microlentes-gravitacionais.

Finalmente, este trabalho foi submetido para a revista brasileira de ensino de Física que faz parte do Estrato Qualis A1 da CAPES na área de Física e Astronomia.

Referências

[1] Einstein A., 1936, Sci, 84, 506. doi:10.1126/science.84.2188.506

[2] Bond I.A., Udalski A., Jaroszynski M., Rattenbury N.J., Paczynski B., Soszynski I., Wyrzykowski L., et al., 2004, ApJL, 606, L155. doi:10.1086/420928

[3] Bruno, G., De l’infinito, universo e mondi. Londres, 1584.

Anexos



Figura 1: Ilustração do passo a passo da confecção das lentes.



Figura 2: Resultado final para uma lente simples (superior) e uma lente binária (inferior).



Figura 3: Aparato com a parte mecânica e elétrica. A base de madeira é usada para a fixação do trilho.



Figura 4: Placa de circuito impresso do circuito de controle do projeto.



Figura 5: Esquema elétrico do experimento.

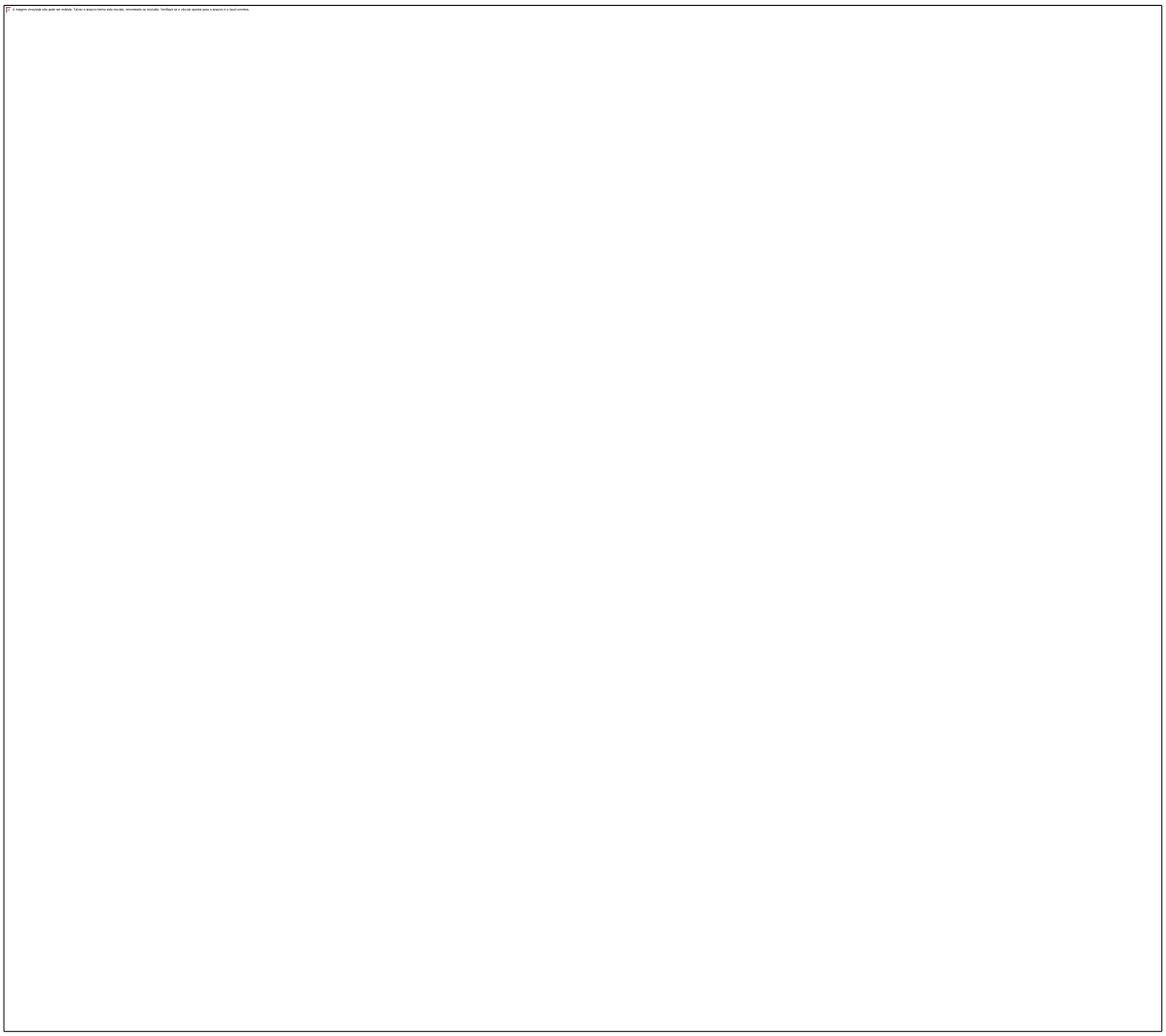


Figura 6: Layout da PCI apresentando a conexão entre o Arduino, o driver, a alimentação e os sensores.

CÓDIGO: ET1527

AUTOR: ISABEL MARIA BARBOSA ALVES

ORIENTADOR: SALETE MARTINS ALVES

TÍTULO: Estudo da resistência a fragilização por Hidrogênio de Diferentes Aços Inoxidáveis.

Resumo

O hidrogênio vem ganhando importância como vetor energético, especialmente na transição energética, mas sua interação com metais pode comprometer o desempenho e a integridade de componentes. Este trabalho avaliou a influência da nitretação a plasma (300 °C e 400 °C) sobre o aço inoxidável AISI 316 submetido à hidrogenação eletroquímica, com foco em características superficiais e propriedades tribológicas. As amostras foram preparadas metalograficamente, nitretadas e caracterizadas por MEV-EDS, DRX e microdureza Vickers; em seguida, hidrogenadas eletroquimicamente (solução de 3% NaCl e 0,3% NH_4SCN) e submetidas a ensaios pino-sobre-disco. O MEV indicou maior homogeneidade na amostra nitretada a 400 °C, enquanto a 300 °C apresentou mais partículas, irregularidades e efeito de borda. O EDS mostrou maior concentração de nitrogênio a 300 °C, mas também oxigênio significativo, indicando contaminação e possível oxidação. A nitretação aumentou a microdureza média em relação ao material não tratado, com maior dispersão a 400 °C. Nos ensaios tribológicos, a hidrogenação reduziu o coeficiente de atrito, efeito mais expressivo a 300 °C. Contudo, essa redução não pode ser atribuída somente ao hidrogênio, pois heterogeneidade e oxidação superficial também podem ter contribuído. Assim, a resposta tribológica do AISI 316 resulta da interação entre preparação superficial, nitretação e processamento eletroquímico.

Palavras-chave: Aço AISI 316, nitretação a plasma, fragilização, hidrogênio.

TITLE: Study of the Hydrogen Embrittlement Resistance of Different Stainless Steels.

Abstract

Hydrogen has been gaining importance as an energy vector, especially in the energy transition, but its interaction with metals can compromise the performance and integrity of components. This study evaluated the influence of plasma nitriding (300 °C and 400 °C) on AISI 316 stainless steel subjected to electrochemical hydrogenation, focusing on surface characteristics and tribological properties. Samples were metallographically

prepared, nitrided, and characterized by SEM-EDS, XRD, and Vickers microhardness; they were then electrochemically hydrogenated (3% NaCl and 0.3% NH4SCN solution) and subjected to pin-on-disk tests. SEM showed greater homogeneity in the sample nitrided at 400 °C, while the 300 °C condition displayed more particles, irregularities, and an edge effect. EDS revealed higher nitrogen content at 300 °C, but also significant oxygen, indicating contamination and possible oxidation. Nitriding increased average microhardness relative to the untreated material, with greater dispersion at 400 °C. In the tribological tests, hydrogenation reduced the friction coefficient, an effect most pronounced at 300 °C. However, this reduction cannot be attributed solely to hydrogen, since surface heterogeneity and oxidation may also have contributed. Thus, the tribological response of AISI 316 results from the interaction between surface preparation, nitriding, and electrochemical processing.

Keywords: AISI 316 steel, plasma nitriding, hydrogen, hydrogen embrittlement.

Introdução

O crescente interesse pelo hidrogênio (H_2) como fonte energética está relacionado à possibilidade de seu uso em diferentes setores industriais. Embora já consolidado na produção de metanol, amônia e no refino de petróleo, novas tecnologias associadas à transição energética têm ampliado seu potencial de aplicação. Chen et al. (2024) destacam que essa expansão é impulsionada, entre outros fatores, por sua elevada densidade energética (cerca de 120 MJ/kg), o que favorece seu emprego em setores de difícil descarbonização, como a siderurgia e o transporte pesado. Entretanto, sua utilização exige compreender os efeitos da interação desse elemento com os materiais empregados em componentes de armazenamento e transporte.

Quando absorvido por metais, o hidrogênio pode provocar alterações que comprometem a integridade dos componentes e influenciam seu comportamento tribológico, fenômeno conhecido como fragilização por hidrogênio (FH). Em materiais de elevada resistência, essas alterações podem causar perdas significativas de ductilidade e resistência mecânica. Além das características intrínsecas do metal, fatores como temperatura, pressão de hidrogênio e taxa de deformação influenciam a intensidade do processo. Segundo Dwivedi e Vishwakarma (2018), a presença de hidrogênio pode favorecer fraturas prematuras mesmo com tensões abaixo do limite de escoamento.

A escolha de materiais mais resistentes à interação com o H_2 é, portanto, essencial para garantir segurança e eficiência. Os aços inoxidáveis austeníticos destacam-se pela combinação de propriedades mecânicas, resistência à corrosão e microestrutura favorável em ambientes hidrogenados (Cordeiro, 2024). O AISI 316, pertencente a essa família, apresenta estrutura cúbica de faces centradas (CFC), associada a maior solubilidade — porém menor difusividade — de hidrogênio em comparação a estruturas CCC, além de molibdênio, que contribui para maior resistência à corrosão (Li et al., 2024). Ainda assim, a entrada e permanência do hidrogênio na estrutura metálica pode favorecer alterações localizadas e mecanismos de degradação, tornando importante investigar estratégias complementares de proteção superficial.

Entre as técnicas de modificação superficial, a nitretação a plasma se destaca por alterar a composição e a microestrutura da região tratada (Schibicheski Kurelo et al., 2022). O

processo ocorre por descarga elétrica em atmosfera nitrogenada, cujo bombardeamento iônico promove a difusão do nitrogênio e altera a estrutura cristalina superficial, gerando defeitos e interfaces que podem atuar como sítios de aprisionamento de hidrogênio. Esses sítios não devem ser associados a priori a efeitos positivos ou negativos, pois sua influência depende da natureza, densidade, distribuição e energia de aprisionamento envolvidas.

A difusão do nitrogênio também pode formar nitretos como ε-$Fe_{2-3}N$ e γ′-Fe_4N, associados ao aumento de dureza e resistência ao desgaste, além de contribuírem para o desempenho frente à fadiga e à corrosão. Assim, o tratamento termoquímico produz uma camada superficial com propriedades distintas das do substrato não tratado. No caso dos aços inoxidáveis, esse tipo de tratamento pode representar uma estratégia complementar relevante em ambientes agressivos, ao alterar a interação entre o meio e o substrato e, consequentemente, os mecanismos relacionados à entrada e movimentação do hidrogênio.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da nitretação a plasma (300 °C e 400 °C) sobre o comportamento do aço inoxidável AISI 316 submetido à fragilização eletroquímica, bem como sobre suas propriedades tribológicas. As amostras nitretadas foram caracterizadas por MEV-EDS, DRX e microdureza Vickers, além de ensaios de desgaste pino-sobre-disco, buscando contribuir para a compreensão da relação entre tratamentos superficiais e o desempenho do AISI 316 em aplicações associadas às tecnologias do hidrogênio.

Metodologia

1. Preparação das amostras

Foram utilizadas amostras circulares de aço inoxidável austenítico AISI 316, com dimensões de 31,5 mm de diâmetro. Os corpos de prova foram seccionados em torno mecânico, com refrigeração adequada para evitar alterações microestruturais decorrentes do aquecimento durante o corte, a fim de obter as dimensões necessárias aos tratamentos e ensaios subsequentes. Após o corte, as amostras foram mantidas sem embutimento e submetidas à preparação metalográfica, que consistiu em lixamento mecânico com lixas de granulometria de 200 a 1200 mesh, seguido de polimento com suspensão de alumina até a obtenção de uma superfície com acabamento de aproximadamente 1 µm. Entre as etapas de lixamento, polimento e antes dos tratamentos superficiais, as amostras foram limpas em banho ultrassônico a fim de remover resíduos e contaminantes superficiais. A preparação superficial teve como objetivo reduzir irregularidades provenientes do processo de corte e proporcionar condições adequadas para a realização dos tratamentos e das caracterizações posteriores.

2. Nitretação a plasma

As amostras de aço inoxidável AISI 316 foram submetidas à nitretação a plasma em duas condições de temperatura (300 °C e 400 °C), a fim de avaliar a influência do tratamento sobre as características superficiais do material. Os tratamentos foram realizados em um reator de plasma de configuração similar à descrita por De Araújo et al. (2025). Inicialmente, foi realizado um pré-sputtering para limpeza e ativação da superfície. Em seguida, as amostras foram submetidas ao processo de nitretação, conforme as condições apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na nitretação a plasma do aço AISI 316.

3. Caracterização das amostras

Após a preparação e os tratamentos superficiais, as amostras foram caracterizadas por diferentes técnicas, com o objetivo de avaliar as alterações promovidas pela nitretação.

A análise da morfologia e da composição química da superfície foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia de energia dispersiva de raios X (MEV-EDS). Para essa análise, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura modelo Vega LMU 4ª Geração, da marca Tescan, pertencente ao Laboratório de Tecnologia Ambiental (LABTAM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

A identificação das fases presentes nas amostras foi realizada por difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro Shimadzu XRD-7000, localizado no LABTAM/UFRN.

A caracterização da dureza superficial foi realizada por meio de ensaios de microdureza Vickers, empregando cargas de 50 gf e 500 gf — a menor carga voltada à avaliação da região mais próxima à superfície nitretada, e a maior carga permitindo avaliar a dureza em profundidades maiores. Para cada condição, foram realizadas [inserir número] indentações, com tempo de aplicação de carga de 15 s. Os ensaios foram realizados no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica e Caracterização de Materiais (LIME) da UFRN, utilizando um microdurômetro Vickers Future-Tech FM-810.

4. Fragilização eletroquímica

Após a nitretação e as caracterizações iniciais, as amostras foram submetidas à fragilização por hidrogênio para promover a introdução de hidrogênio no material. O carregamento foi realizado à temperatura ambiente, em célula eletroquímica de dois eletrodos, utilizando uma solução aquosa contendo 3% de NaCl e 0,3% de NH_4SCN, este último atuando como veneno de recombinação, favorecendo a absorção de hidrogênio atômico na superfície em detrimento da sua recombinação em H_2 molecular.

A etapa de fragilização foi realizada após a nitretação, de modo a avaliar a influência do tratamento superficial sobre o comportamento do aço AISI 316 diante da exposição ao hidrogênio, possibilitando comparar o desempenho das diferentes condições de tratamento após o carregamento.

5. Ensaio tribológico

O comportamento tribológico das amostras foi avaliado por meio do ensaio de desgaste do tipo pino-sobre-disco (pin-on-disk), realizado em um tribômetro modelo TE-165 LE-131/2014. Foi utilizada esfera de aço cromo de 6 mm de diâmetro, sob carga normal de 10 N. Foram utilizadas duas condições de raio de trajetória, mantendo-se a velocidade de deslizamento e a distância percorrida, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos ensaios tribológicos do aço AISI 316.

Resultados e Discussões

1. Caracterização morfológica das superfícies nitretadas

A caracterização morfológica das superfícies do aço inoxidável AISI 316 foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de avaliar as alterações promovidas pelo tratamento de nitretação a plasma. Foram analisadas amostras submetidas às temperaturas de 300 °C e 400 °C, considerando diferentes condições de preparação superficial. A análise também contemplou regiões distintas das amostras, permitindo avaliar a uniformidade da superfície após o tratamento.

Figura 1 – Aspecto superficial das amostras de aço inoxidável AISI 316 após o tratamento de nitretação a plasma. Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A Figura 1 apresenta uma visão geral do aspecto superficial das três amostras nas condições avaliadas. Observa-se que a amostra correspondente à primeira condição apresentou coloração relativamente homogênea em toda a superfície, com tonalidade acinzentada, característica da nitretação. Já as demais amostras exibiram uma variação de coloração entre a região central e as bordas, evidenciando tons que vão do azulado no centro a tonalidades douradas e avermelhadas próximas à borda. Essa variação cromática é característica de efeitos de interferência óptica associados a diferenças de espessura da camada nitretada, e pode estar relacionada ao chamado efeito de borda, fenômeno comumente observado em tratamentos por plasma decorrente da concentração do campo elétrico nas extremidades das amostras. Essa observação preliminar é consistente com a maior heterogeneidade identificada por MEV nas regiões próximas às bordas, discutida a seguir.

Na Figura 2, referente à amostra lixada e nitretada a 400 °C, observa-se que a região central da superfície, apresentada na Figura 2(a), possui aspecto relativamente homogêneo, com poucas partículas e descontinuidades aparentes. À medida que a análise se desloca para regiões mais afastadas do centro, como observado nas Figuras 2(b) e 2(c), torna-se mais evidente a presença de partículas e irregularidades superficiais. Essas diferenças sugerem uma variação nas características da superfície ao longo da amostra, possivelmente associada às condições locais às quais o material foi submetido durante o tratamento.

Figura 2 – Micrografias obtidas por MEV da amostra de AISI 316 lixada e nitretada a 400 °C: (a) região central; (b) região intermediária; (c) região de borda. Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A maior quantidade de partículas e irregularidades observada nas regiões intermediária e de borda pode contribuir para a heterogeneidade da superfície. Essas características são particularmente relevantes para o comportamento tribológico, uma vez que alterações na topografia superficial podem modificar as condições de contato entre as superfícies durante o deslizamento. Regiões mais irregulares podem favorecer variações locais de pressão e a interação com partículas presentes na interface de contato, influenciando os mecanismos de desgaste.

As micrografias da amostra lixada e nitretada a 300 °C, apresentadas na Figura 3, evidenciam uma superfície com características distintas daquela observada na condição tratada a 400 °C. Nas regiões central e intermediária, correspondentes às Figuras 3(a) e 3(b), observam-se partículas finas distribuídas sobre a superfície. Na região próxima à borda, Figura 3(c), as irregularidades tornam-se mais pronunciadas, indicando maior heterogeneidade superficial nessa região.

Figura 3 – Micrografias obtidas por MEV da amostra de aço inoxidável AISI 316 lixada e nitretada a 300 °C em diferentes regiões: (a) central; (b) intermediária; (c) próxima à borda. Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Para a amostra polida e nitretada a 300 °C, as micrografias apresentadas na Figura 4 também evidenciam diferenças entre as regiões analisadas. Nas regiões central e intermediária observam-se partículas e descontinuidades distribuídas sobre a superfície; na região próxima à borda, Figura 4(c), verifica-se maior quantidade de irregularidades e aspecto mais heterogêneo.

Figura 4 – Micrografias obtidas por MEV da amostra de AISI 316 polida e nitretada a 300 °C: (a) região central; (b) região intermediária; (c) região de borda. Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A comparação entre as amostras tratadas a 300 °C permite avaliar a influência da condição inicial da superfície. Embora as amostras lixada e polida tenham sido submetidas à mesma temperatura de nitretação, ambas apresentaram características morfológicas não uniformes, principalmente nas regiões próximas às bordas, o que indica que, além da temperatura de tratamento, o acabamento superficial prévio e as condições locais de processamento influenciam a resposta da superfície após a nitretação.

De forma geral, a comparação entre as três condições evidencia que o tratamento de nitretação promoveu superfícies com características morfológicas distintas: a amostra lixada e tratada a 400 °C apresentou maior homogeneidade na região central em relação às condições nitretadas a 300 °C, nas quais a presença de partículas e irregularidades foi mais evidente. Em todas as condições, as regiões próximas às bordas apresentaram maior heterogeneidade superficial, resultado relevante para a interpretação do comportamento tribológico, uma vez que essas diferenças podem influenciar o coeficiente de atrito e os mecanismos de desgaste.

2. Composição química superficial por EDS

A composição química das superfícies nitretadas foi avaliada por espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS), permitindo identificar os principais elementos presentes nas regiões analisadas.

Tabela 3 – Composição química superficial das amostras de AISI 316 após a nitretação a plasma.

A amostra lixada e nitretada a 400 °C apresentou concentração de 7,33% de nitrogênio, enquanto as amostras tratadas a 300 °C apresentaram concentrações de 16,30% e 16,24%, respectivamente. Cabe ressaltar que a Tabela 3 apresenta apenas os elementos de interesse selecionados (Fe, O, N e Cr), não contemplando os demais elementos da liga (como Ni, Mo e Mn) também detectados por EDS; por esse motivo, o somatório dos percentuais listados não totaliza 100%.

Apesar da maior concentração de nitrogênio nas amostras tratadas a 300 °C, a análise morfológica demonstrou que essas condições apresentaram maior quantidade de partículas e irregularidades superficiais. Esse comportamento indica que a concentração de nitrogênio detectada por EDS não deve ser utilizada isoladamente como parâmetro para determinar a qualidade da camada nitretada.

Figura 5 – Composição química superficial das amostras de AISI 316 obtida por EDS. Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Outro aspecto relevante está relacionado à presença de oxigênio. A amostra tratada a 400 °C apresentou concentração de 49,12% de oxigênio, enquanto as amostras tratadas a 300 °C apresentaram valores de 18,46% e 15,77%. Durante a realização dos tratamentos, foi identificada a ocorrência de contaminação que pode ter favorecido a oxidação da superfície das amostras. Dessa forma, a presença significativa de oxigênio deve ser considerada na interpretação dos resultados, uma vez que a formação de regiões oxidadas pode ter alterado as características inicialmente esperadas para as superfícies nitretadas.

3. Caracterização das fases por difração de raios X

A caracterização estrutural das amostras foi realizada por difração de raios X, sendo os difratogramas obtidos para a condição não tratada e para as amostras nitretadas a 300 °C e 400 °C apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Difratogramas de raios X das amostras de aço inoxidável AISI 316: (a) condição não tratada; (b) nitretada a 300 °C; (c) nitretada a 400 °C. Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Na condição não tratada, Figura 6(a), observa-se a predominância de um pico de elevada intensidade próximo a 43–44° em 2θ, acompanhado por reflexões de menor intensidade em aproximadamente 51° e 74–75° — comportamento característico da microestrutura austenítica do AISI 316.

Após a nitretação a 300 °C, Figura 6(b), verifica-se a manutenção da principal reflexão próxima a 43°, embora o difratograma apresente alterações no perfil dos picos e aumento mais expressivo da intensidade de fundo em determinadas regiões, além de reflexão adicional próxima a 48–50°. Essas modificações indicam que o tratamento promoveu alterações na região superficial, possivelmente relacionadas à incorporação de nitrogênio na estrutura cristalina.

Para a condição nitretada a 400 °C, Figura 6(c), observa-se difratograma mais complexo, com maior número de reflexões, especialmente nas regiões próximas a 30–35°, 50° e ângulos superiores, sugerindo que o aumento da temperatura favoreceu modificações mais pronunciadas na estrutura superficial.

A comparação entre os difratogramas evidencia que a nitretação promoveu alterações estruturais dependentes da temperatura empregada: a condição de 300 °C apresentou perfil mais semelhante ao do material não tratado, enquanto a amostra tratada a 400 °C apresentou maior quantidade de picos adicionais, possivelmente relacionados à evolução da camada nitretada e à formação de novas estruturas na superfície. Essas alterações também podem estar relacionadas às diferenças observadas na morfologia e no comportamento tribológico das amostras.

4. Microdureza das superfícies tratadas

A microdureza das amostras foi avaliada para verificar as alterações promovidas pela nitretação na região superficial do material.

Tabela 4 – Valores médios de microdureza Vickers do AISI 316 nas diferentes condições.

Ambas as condições de nitretação apresentaram microdureza média superior à do material não tratado, sendo o maior valor obtido para a condição de 300 °C (244,11 HV), seguido pela condição de 400 °C (239,29 HV), ante 206,80 HV do material não nitretado. A diferença entre as duas temperaturas foi relativamente pequena.

A análise dos desvios-padrão, no entanto, revela diferenças importantes: a amostra não tratada apresentou baixa dispersão (9,20 HV), indicando maior uniformidade, enquanto as amostras nitretadas apresentaram dispersão consideravelmente superior, especialmente a condição de 400 °C (119,30 HV). Essa elevada variação sugere que a superfície nitretada não apresentou comportamento de dureza homogêneo, o que pode estar relacionado às diferenças morfológicas observadas por MEV — incluindo partículas e irregularidades — e também às alterações associadas à contaminação e à oxidação superficial identificadas durante o tratamento.

Foram registrados valores individuais elevados nas amostras nitretadas (441,5 HV na condição de 300 °C e 556,3 HV na condição de 400 °C), acompanhados de valores consideravelmente inferiores em outras regiões das mesmas amostras, reforçando a existência de variações locais na superfície tratada. Assim, os resultados de microdureza devem ser interpretados em conjunto com as análises de MEV e DRX, relacionando a variação da dureza às modificações morfológicas e estruturais observadas.

5. Comportamento tribológico das amostras

O comportamento tribológico foi avaliado por meio da variação do coeficiente de atrito ao longo do tempo de ensaio, comparando as amostras sem tratamento, nitretada e fragilizada após exposição ao hidrogênio.

Figura 7 – Variação do coeficiente de atrito em função do tempo: (a) amostra sem tratamento; (b) nitretada e lixada a 400 °C; (c) fragilizada, nitretada e lixada a 400 °C; (d) fragilizada, nitretada e lixada a 300 °C. Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Na condição apenas lixada, Figura 7(a), observa-se rápida estabilização do coeficiente de atrito em valores próximos de 0,45, com oscilações em faixa relativamente constante ao longo do ensaio.

Para a amostra nitretada e lixada a 400 °C, Figura 7(b), os valores permaneceram relativamente elevados (entre ~0,35 e 0,55), sem redução progressiva e contínua. A nitretação a 400 °C, portanto, não resultou em diminuição expressiva do coeficiente de atrito nas condições avaliadas — resultado esperado, já que a formação de nitretos de ferro tende a aumentar o coeficiente de atrito na superfície, embora normalmente reduza o desgaste.

Comportamento distinto foi observado na amostra fragilizada, nitretada e lixada a 400 °C, Figura 7(c): valores iniciais próximos de 0,40–0,45, seguidos de redução gradual, estabilizando-se predominantemente entre 0,20 e 0,30 após aproximadamente 2000 s.

A condição fragilizada, nitretada e lixada a 300 °C, Figura 7(d), apresentou a redução mais acentuada: valores iniciais próximos de 0,30, caindo progressivamente para menos de 0,10 e estabilizando entre ~0,04 e 0,07 — os menores valores de coeficiente de atrito entre todas as condições avaliadas.

De maneira geral, as amostras não hidrogenadas (lixada e nitretada a 400 °C) apresentaram coeficientes de atrito elevados e estáveis, enquanto as amostras hidrogenadas apresentaram redução progressiva, com destaque para a condição nitretada a 300 °C.

6. Influência da hidrogenação no comportamento tribológico

A comparação entre as condições evidenciou mudança expressiva no comportamento tribológico das amostras submetidas à hidrogenação eletroquímica, mais evidente na condição nitretada a 300 °C. Essa alteração, contudo, não deve ser interpretada automaticamente como evidência de fragilização ou de melhoria do desempenho tribológico: a redução do coeficiente de atrito demonstra resposta diferente da interface de contato após o processamento eletroquímico, mas, na ausência de análise das trilhas de desgaste, não é possível associá-la a um mecanismo específico.

O estado inicial das superfícies antes da hidrogenação também deve ser considerado. As caracterizações por MEV e EDS evidenciaram maior homogeneidade na superfície tratada a 400 °C e maior presença de partículas e irregularidades nas condições tratadas a 300 °C, além de concentrações significativas de oxigênio (49,12% na condição a 400 °C e 18,46% na condição a 300 °C), reforçando que a contaminação ocorrida durante o processamento contribuiu para modificar a superfície das amostras.

Assim, a redução do coeficiente de atrito nas amostras hidrogenadas parece decorrer da interação entre as características já estabelecidas pela nitretação, as alterações provocadas pelo processo eletroquímico e a condição real da superfície — heterogênea e com indícios de oxidação —, e não de um único fator isolado. A hidrogenação eletroquímica influenciou o comportamento tribológico do AISI 316, de forma mais expressiva na amostra nitretada a 300 °C, mas essa redução não pode ser atribuída exclusivamente à ação do hidrogênio, já que a oxidação e a consequente passivação da superfície podem ter contribuído significativamente para o resultado observado.

7. Relação entre nitretação, hidrogenação e comportamento tribológico

A análise integrada demonstra que a resposta do AISI 316 não pode ser atribuída exclusivamente à temperatura de nitretação ou à posterior exposição ao hidrogênio. As diferentes etapas de processamento produziram superfícies com características distintas, associadas às respostas obtidas nas análises morfológicas, químicas, de microdureza e tribológicas.

As imagens de MEV mostraram maior homogeneidade na região central da amostra nitretada a 400 °C, enquanto as condições a 300 °C apresentaram maior quantidade de partículas, irregularidades e efeito de borda mais pronunciado, evidenciando que a temperatura de nitretação influenciou não apenas a composição, mas também a distribuição e a uniformidade das características superficiais.

A presença significativa de oxigênio, associada às características observadas nas micrografias, sugere que a contaminação durante o tratamento favoreceu a oxidação da superfície e contribuiu para a formação de regiões com características distintas, e, consequentemente, para a dispersão observada nas demais análises. Essa heterogeneidade também se reflete nos resultados de microdureza, cuja dispersão foi significativamente maior após o tratamento, especialmente na condição a 400 °C.

No ensaio tribológico, essa influência conjunta tornou-se evidente: as condições hidrogenadas apresentaram redução progressiva do coeficiente de atrito, mais acentuada na condição nitretada a 300 °C, demonstrando que a combinação entre as modificações superficiais prévias e o processamento eletroquímico resultou em condições de deslizamento associadas a menor atrito. Essa interpretação integrada evita atribuir a redução do atrito exclusivamente ao hidrogênio ou exclusivamente à nitretação, reconhecendo que as amostras já apresentavam superfícies distintas antes mesmo do carregamento eletroquímico.

Conclusão

Os resultados obtidos permitem concluir que a nitretação a plasma promoveu modificações significativas na superfície do aço inoxidável AISI 316, com resposta dependente das condições de tratamento empregadas. A amostra nitretada a 400 °C apresentou maior homogeneidade morfológica, enquanto as condições tratadas a 300 °C apresentaram maior quantidade de partículas, irregularidades e efeito de borda mais

pronunciado, indicando que um maior teor de nitrogênio (identificado por EDS) não esteve necessariamente associado a uma superfície mais uniforme.

A ocorrência de contaminação durante os tratamentos, evidenciada pela presença significativa de oxigênio nas análises de EDS, mostrou-se um fator determinante para a interpretação dos demais resultados. Esse achado indica que a oxidação superficial interferiu nas características inicialmente esperadas para as amostras nitretadas e deve ser considerada em estudos futuros que busquem isolar os efeitos exclusivos da nitretação.

Quanto à microdureza, verificou-se aumento dos valores médios após a nitretação em relação à condição não tratada, acompanhado, porém, de elevada dispersão nas amostras tratadas, resultado compatível com a heterogeneidade morfológica identificada por MEV e reforça que a temperatura de nitretação, por si só, não garante uniformidade das propriedades superficiais.

No que se refere ao comportamento tribológico, conclui-se que a hidrogenação eletroquímica esteve associada a uma redução expressiva do coeficiente de atrito, mais acentuada na amostra nitretada a 300 °C. Contudo, essa redução não pode ser interpretada como decorrente exclusivamente da ação do hidrogênio: a interação entre a condição superficial prévia (heterogeneidade morfológica e indícios de oxidação) e o processamento eletroquímico mostrou-se determinante para a resposta observada. Assim, a análise integrada das caracterizações — MEV, EDS, DRX, microdureza e ensaio de desgaste, o que evidencia que o desempenho do AISI 316 resultou da combinação entre a preparação superficial, a temperatura de nitretação e a hidrogenação, e não de um único fator isolado.

De forma geral, o estudo demonstra que a nitretação a plasma é capaz de alterar a morfologia, a composição e a dureza superficial do AISI 316, com potencial de influenciar sua resposta tribológica em ambientes relacionados às tecnologias do hidrogênio. Entretanto, os resultados também reforçam a necessidade de controle mais rigoroso das condições de processamento, de modo a minimizar contaminações e oxidações que possam mascarar os efeitos específicos do tratamento. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a análise das trilhas de desgaste geradas nos ensaios tribológicos, o que permitiria identificar com maior precisão os mecanismos associados às reduções de coeficiente de atrito observadas, especialmente nas condições submetidas à hidrogenação eletroquímica.

Referências

ARAÚJO, A. Í. de et al. A novel technology to deposition diamond-like carbon thin films: cathodic cylinder plasma deposition. JOM, v. 77, n. 9, p. 6387–6399, 2025. DOI: 10.1007/s11837-025-07572-z.

CHEN, Y.-S. et al. Hydrogen trapping and embrittlement in metals – A review. International Journal of Hydrogen Energy, v. 136, p. 789–821, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.076.

CORDEIRO, A. O efeito do hidrogênio nos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304L revestidos com alumínio. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2024.

DWIVEDI, S. K.; VISHWAKARMA, M. Hydrogen embrittlement in different materials: A review. International Journal of Hydrogen Energy, v. 43, n. 46, p. 21603–21616, 2018. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.201.

SCHIBICHESKI KURELO, B. C. E. et al. Improved saline corrosion and hydrogen embrittlement resistances of superaustenitic stainless steel by PIII nitriding. Journal of Materials Research and Technology, v. 18, p. 1717–1731, 2022. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.03.072.

SHIN, D.-H.; KIM, S.-J. Effect of hydrogen embrittlement on mechanical characteristics of DLC-coating for hydrogen valves of FCEVs. npj Materials Degradation, v. 8, n. 1, art. 73, 2024. DOI: 10.1038/s41529-024-00488-8.

Anexos



Tabela 1 – Parâmetros utilizados na nitretação a plasma do aço AISI 316.

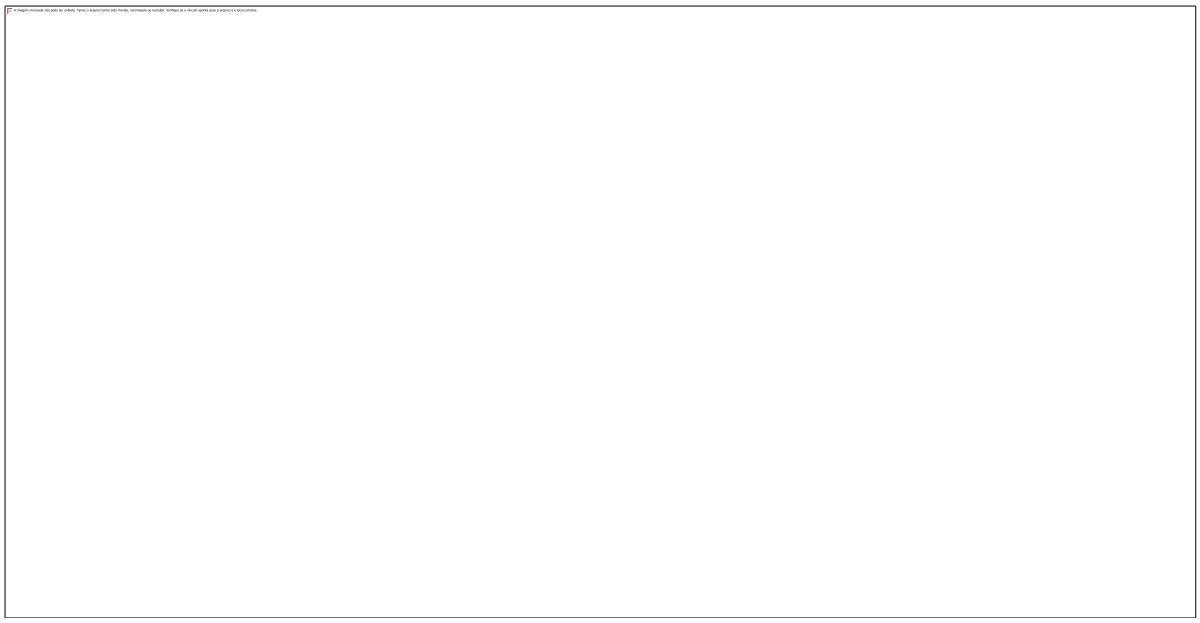


Figura 1 – Aspecto superficial das amostras de aço inoxidável AISI 316 após o tratamento de nitretação a plasma.



Figura 2 – Micrografias obtidas por MEV da amostra de AISI 316 lixada e nitretada a 400 °C: (a) região central; (b) região intermediária; (c) região de borda.

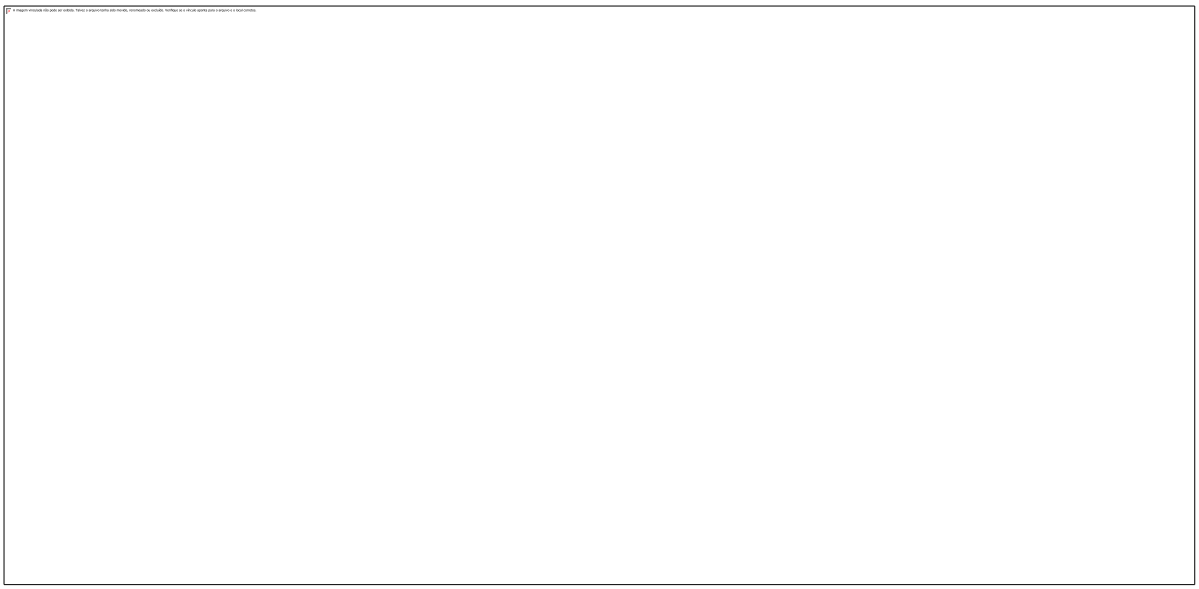


Figura 3 – Micrografias obtidas por MEV da amostra de aço inoxidável AISI 316 lixada e nitretada a 300 °C em diferentes regiões: (a) central; (b) intermediária; e (c) próxima à borda.

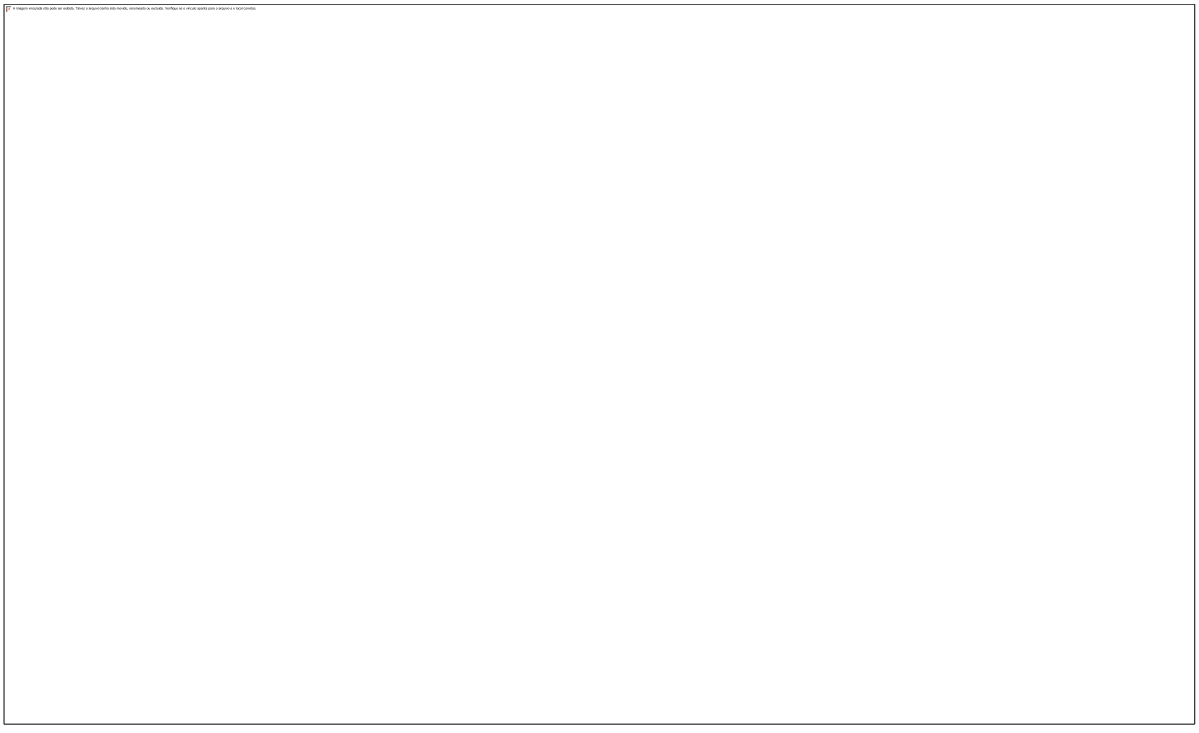


Figura 4 – Micrografias obtidas por MEV da amostra de AISI 316 polida e nitretada a 300 °C: (a) região central; (b) região intermediária; (c) região de borda.

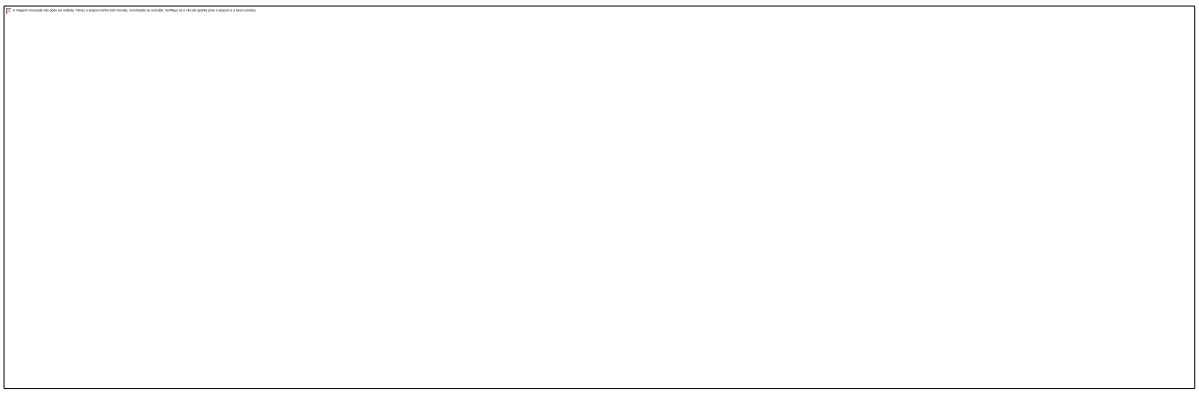


Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos ensaios tribológicos do aço AISI 316.

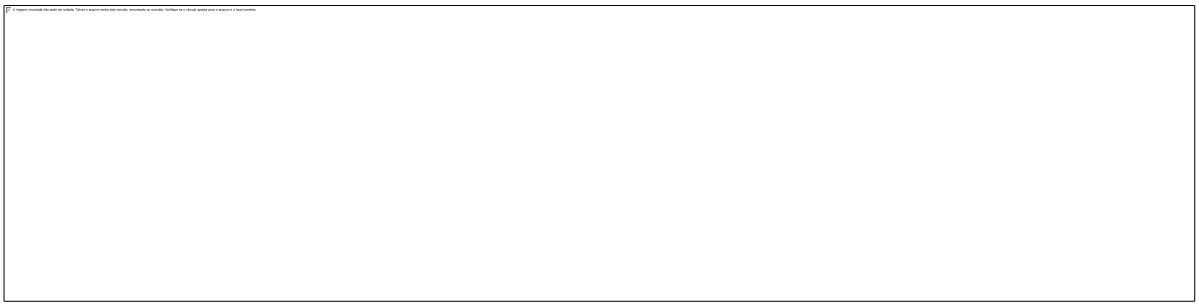


Tabela 3 – Composição química superficial das amostras de AISI 316 após a nitretação a plasma.

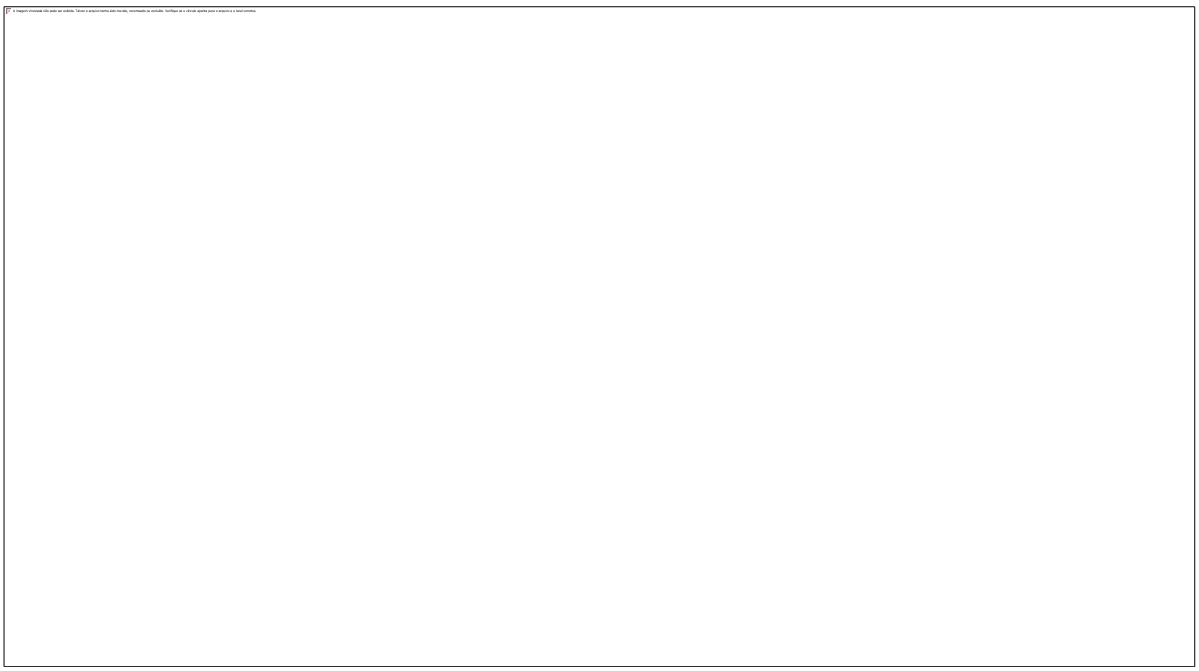


Figura 5 – Composição química superficial das amostras de AISI 316 obtida por EDS.

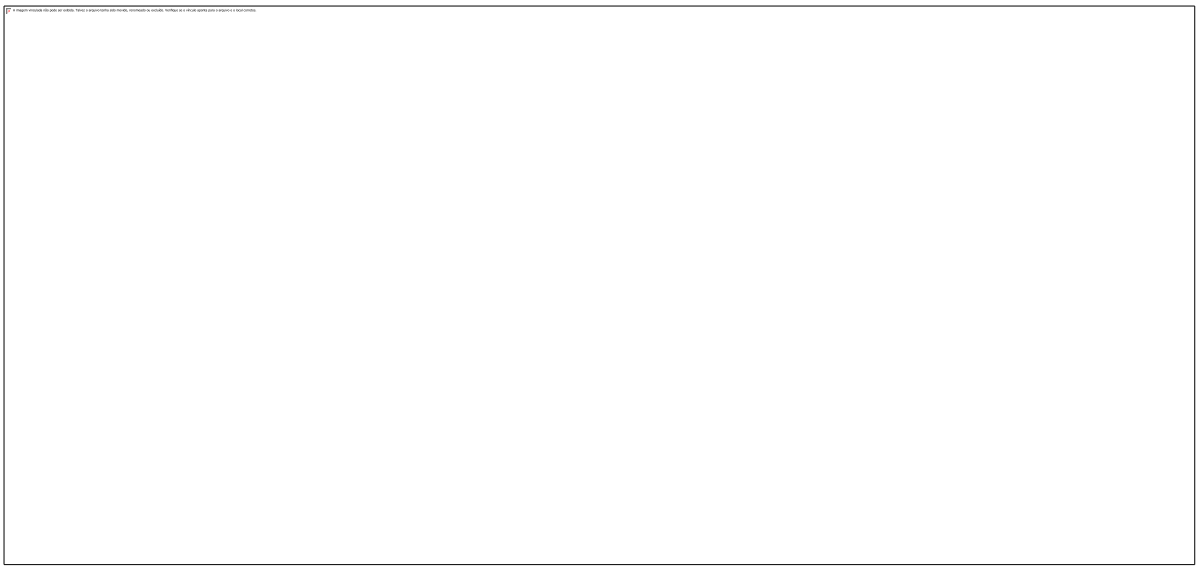


Figura 6 – Difratogramas de raios X das amostras de aço inoxidável AISI 316: (a) condição não tratada; (b) nitretada a 300 °C; e (c) nitretada a 400 °C.

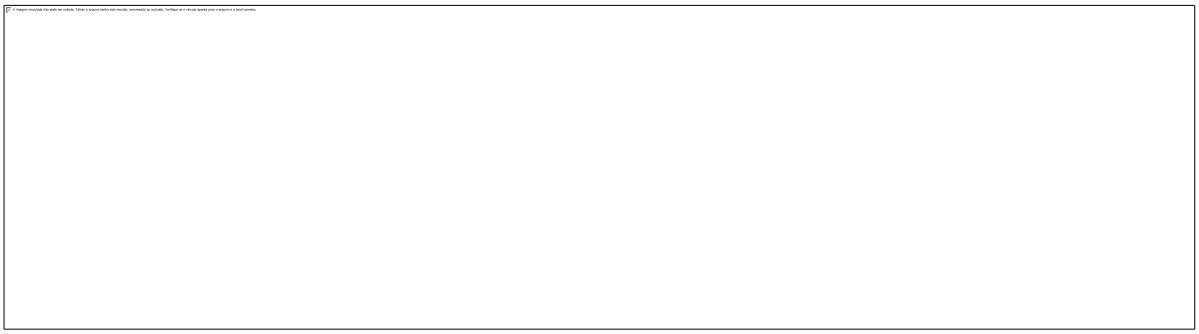


Tabela 4 – Valores médios de microdureza Vickers obtidos para o aço inoxidável AISI 316 nas diferentes condições.



Figura 7 – Variação do coeficiente de atrito em função do tempo para as diferentes condições do aço inoxidável AISI 316: (a) amostra sem tratamento; (b) amostra nitretada e lixada a 400 °C; (c) amostra fragilizada, nitretada e lixada a 400 °C; e (d) amost

CÓDIGO: ET1555

AUTOR: LUIS FELIPE OLIVEIRA SILVA

ORIENTADOR: ELISAMA VIEIRA DOS SANTOS

TÍTULO: Rota Eletroquímica Integrada para Processamento Têxtil Sustentável com Reúso de Água e Cogeração de Hidrogênio Verde

Resumo

Síntese focada no tratamento de efluentes reais de tingimento de algodão (monocromáticos e tricrômicos) via oxidação anódica com eletrodos de BDD e DSA, avaliando a remoção de cor, DQO, produção de persulfato, cogeração de H_2 verde e viabilidade de múltiplos ciclos de tingimento com a água de reúso.

Palavras-chave: Tratamento de efluentes. Eletrooxidação. Reúso de água. Hidrogênio ver

TITLE: Integrated Electrochemical Route to Sustainable Textile Processing through Water Reuse and Hydrogen Recovery

Abstract

A synthesis focused on the treatment of real cotton dyeing effluents (monochromatic and trichromatic) via anodic oxidation with BDD and DSA electrodes, evaluating color removal, COD, persulfate production, green H_2 cogeneration, and the feasibility of multiple dyeing cycles with reuse water.

Keywords: Wastewater treatment. Electrooxidation. Water reuse. Green hydrogen.

Introdução

O trabalho contextualiza o consumo massivo de água e insumos (sais e corantes reativos) na indústria têxtil, apresentando os Processos Oxidativos Avançados

Eletroquímicos (POAE) como alternativa sustentável. É realizada a diferenciação entre ânodos ativos (DSA Ti/RuO2-IrO2-TiO2) e não-ativos (BDD - Nb/BDD) na geração de radicais hidroxila (•OH) e persulfato (S2O8^2-), além da proposta de acoplamento da reação de evolução de hidrogênio (REH) no cátodo com energia solar fotovoltaica para cogeração de energia limpa.

Metodologia

Na preparação dos efluentes, realizou-se o tingimento de algodão 100% com corantes reativos azul (RB109), vermelho (RR120), amarelo (RY105) e mistura tricrômica contendo eletrólitos (Na2SO4, Na2CO3, NaOH). O sistema eletroquímico consistiu em um reator de fluxo de duplo compartimento separado por membrana de troca aniônica (AEMEC, Fumasep FAS-50), ânodos de BDD/Nb ou DSA e cátodo de malha de aço inoxidável, sob densidade de corrente de 100 mA cm^-2 por 10 h. As análises analíticas compreenderam a descoloração por espectrofotometria UV-Vis, decaimento de DQO por digestão térmica, quantificação de ácidos carboxílicos por HPLC, análise colorimétrica CIELAB (Delta E^*, Delta L^*, Delta a^*, Delta b^*) e força de tingimento (K/S) no reúso. Na modelagem de sustentabilidade, foram estabelecidos o inventário e as fronteiras da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), bem como as análises termodinâmicas de consumo de energia (E_{EO} e SEC) e recuperação energética do hidrogênio.

Resultados e Discussões

Na geração de oxidantes, verificou-se a produção de persulfato residual de até 4.90 mmol L-1 com o BDD devido à oxidação de íons sulfato da receita de tingimento. A cogeração de hidrogênio apresentou produção linear de 7.3 L de H2 em 10 h para ambos os sistemas, com eficiência faradaica próxima a 100% e recuperação de energia de até 21% (com menor consumo elétrico do DSA). Os resultados da ACV compararam os cenários de tratamento convencional (CT), eletroquímico solar (ET) e eletroquímico com reúso integrado (ETC), comprovando reduções expressivas em pegada de carbono e uso de água.

Na estratégia de reúso, avaliou-se a comparação de 5 ciclos de tingimento sucessivos. O DSA manteve excelente uniformidade de cor (Delta E^* = 6.20 no 5° ciclo) devido ao acúmulo benéfico de ácidos orgânicos (oxálico, acético, malônico) que auxiliam no tingimento. Por outro lado, o BDD perdeu eficiência a partir do 2° ciclo (Delta E^* = 15.84 no 5° ciclo) por conta do persulfato residual ativado termicamente (60° C), que degradou preferencialmente o corante azul.

Conclusão

Ocorreu a demonstração de que a rota com ânodo DSA é a mais adequada para a circularidade da água de tingimento (reúso), enquanto o BDD é mais eficiente para mineralização direta (descarte seguro). Houve também a validação da produção descentralizada de H2 verde e a apresentação de sugestões para otimização da remoção de persulfato residual no pós-tratamento com BDD.

Referências

Alessia Amato, Giulia Merli, Marina Prisciandaro, Karima Ayedi, Valentina Innocenzi, Environmental sustainability assessment of different strategies for the treatment of wastewater from textile industry, Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 13, Issue 5, 2025, 118761, https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118761.

Dídac Cuesta-Mota, Anna Serra-Clusellas, Jorge Macanás, Lluc Canals-Casals, Victor López-Grimau, Electrochemical system for simultaneous treatment of textile dyeing effluents and hydrogen recovery, Environmental Research, Volume 293, 2026, 123713, https://doi.org/10.1016/j.envres.2026.123713.

J. Parrilla, I.D.B. Segundo, C.M.F. Marchante, E.V. dos Santos, J. Lobato, S.S.L. Castro, C.A. Martínez-Huitle, M.A. Rodrigo, Proof of Concept for the Organic Electrorefinery Technology with Actual Effluents, Ind Eng Chem Res 63 (2024) 18734-18745. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c02235.

J.C. Cardozo, K.S. Oliveira, A. Shabanloo, C.A. Martínez-Huitle, E. V. dos Santos, Electro-refinery in organic compounds and H2 co-production: from waste valorization to sustainable industrial energy solutions, Curr Opin Chem Eng 52 (2026). https://doi.org/10.1016/j.coche.2026.101254.

K.C.F. Araújo, K.N.O. Silva, M.K.S. Monteiro, D.R. da Silva, M.A. Quiroz, E. V. dos Santos, C.A. Martínez-Huitle, Towards Use of Persulfate Electrogenerated at Boron Doped Diamond Electrodes as Ex-Situ Oxidation Approach: Storage and Service-Life Solution Parameters, J Electrochem Soc 169 (2022) 033506. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac59f8.

Anexos

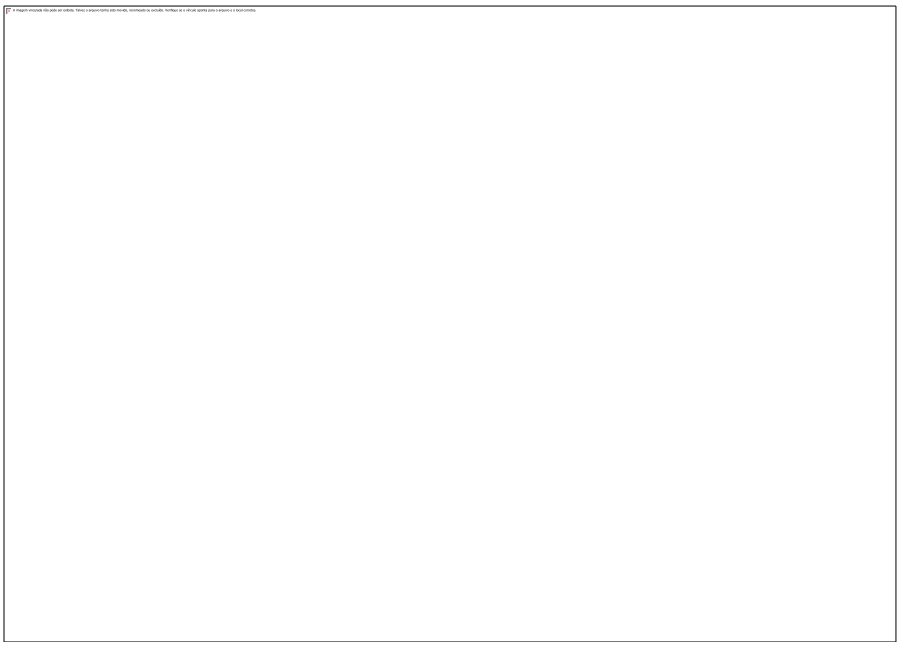


Gráfico 1 – Remoção de cor dos corantes têxteis ao longo do tempo utilizando Eletrodo DSA. Amostras: Azul (▼), Vermelho (■), Amarelo (▲) e Efluente Tricrômico (●). Condição: Corrente de 100 mA/cm².

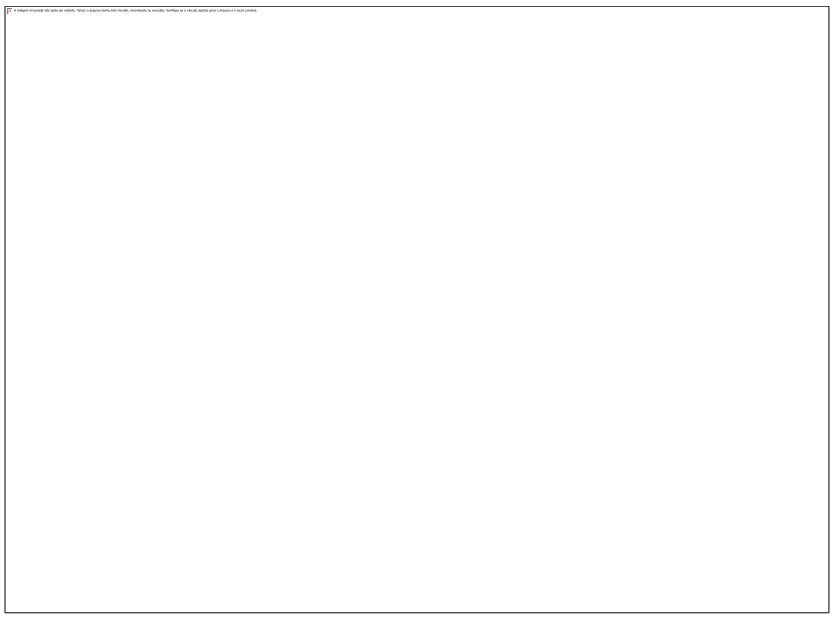


Gráfico 1 – Remoção de cor dos corantes têxteis ao longo do tempo utilizando Eletrodo BDD. Amostras: Azul (▼), Vermelho (■), Amarelo (▲) e Efluente Tricrômico (●). Condição: Corrente de 100 mA/cm².

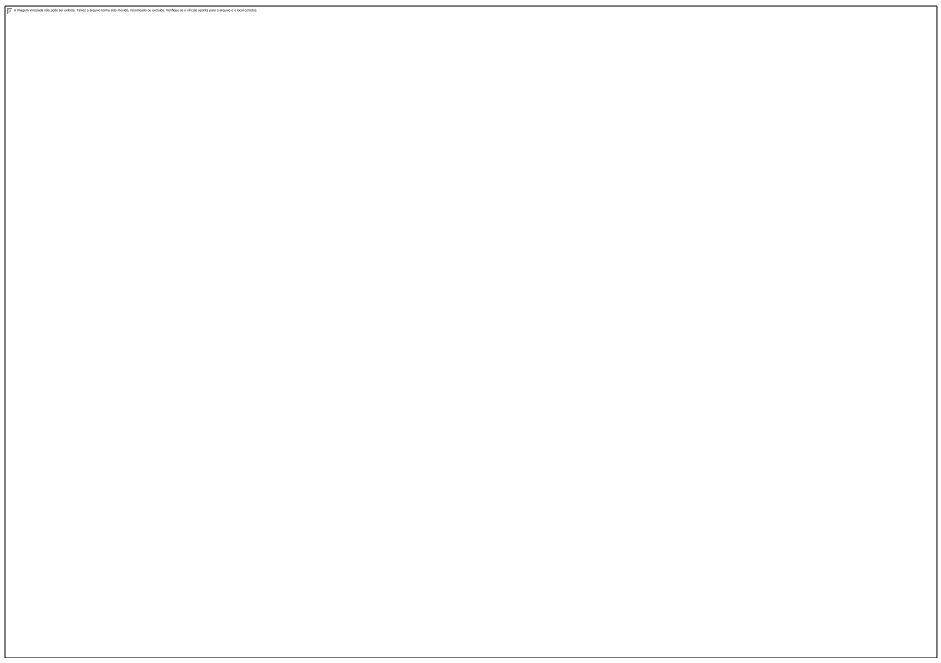


Gráfico 3: Degradação de DQO com Eletrodo DSA

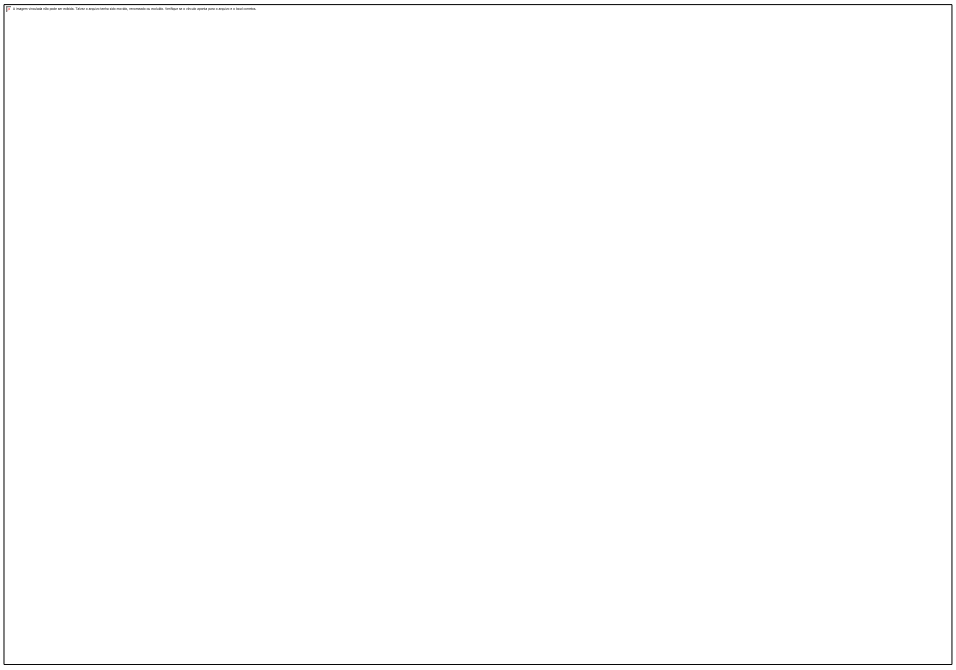


Gráfico 4: Degradação de DQO com Eletrodo BDD

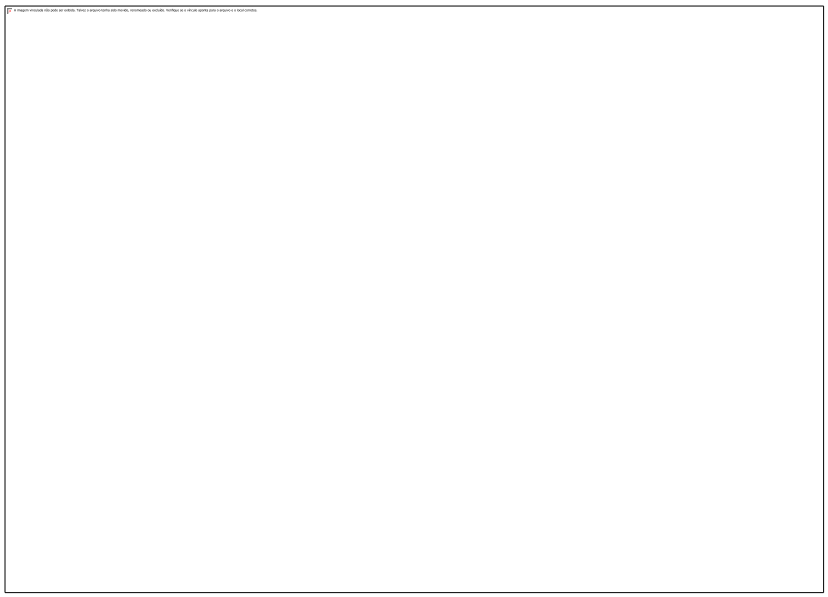


Gráfico 5: Produção de Hidrogênio H2 ao Longo do Tempo

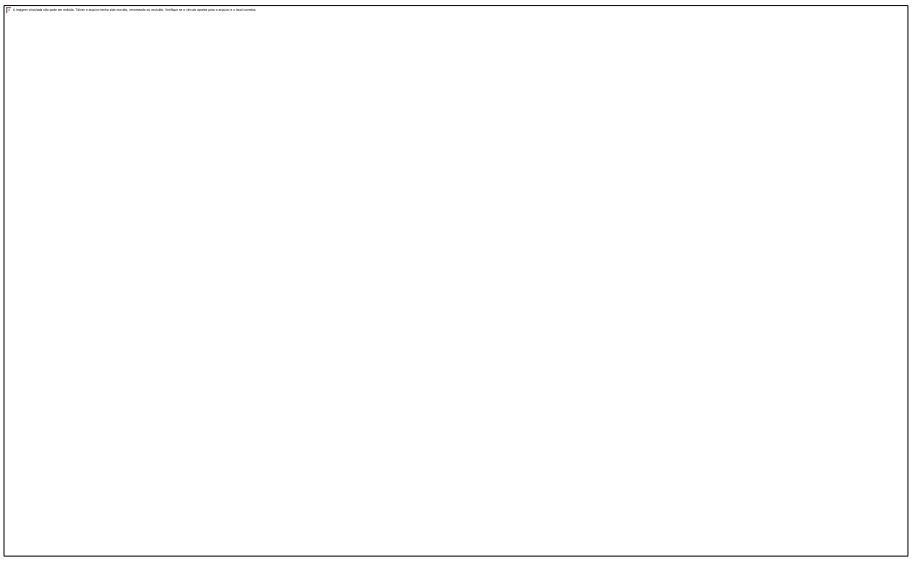


Gráfico 6: Eficiência Faradaica e Recuperação Energética

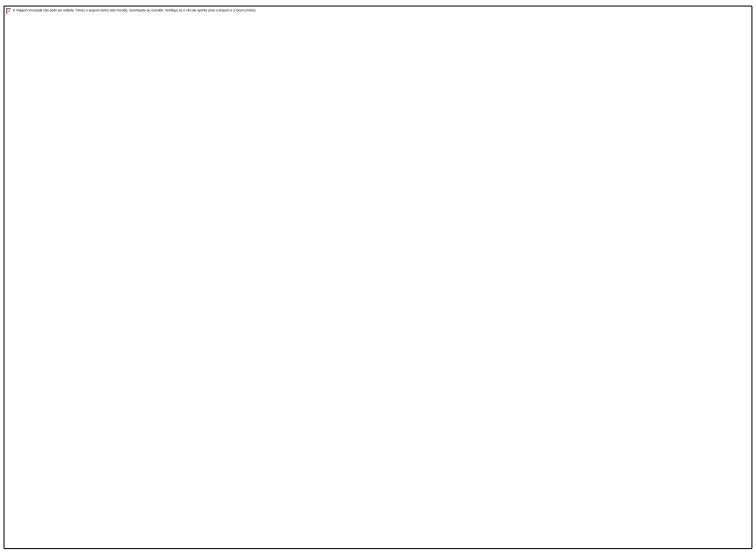


Gráfico 7: Reflectância com Eletrodo DSA nos Ciclos de Tingimento

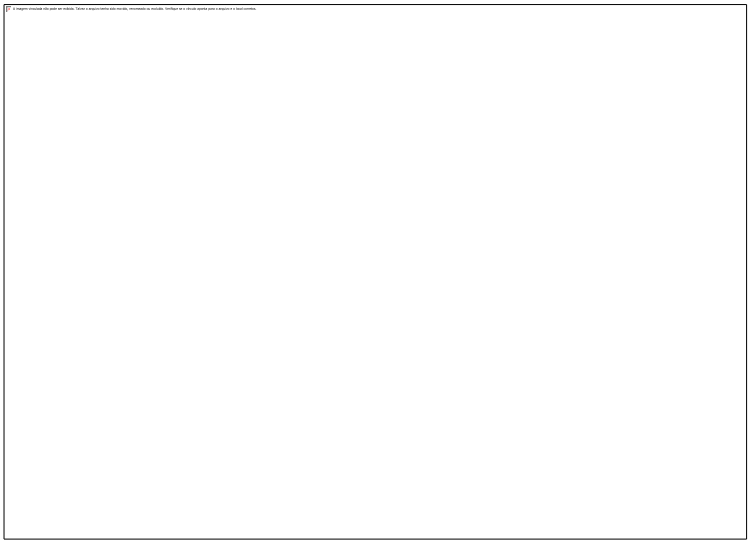


Gráfico 8: Reflectância com Eletrodo BDD nos Ciclos de Tingimento



Gráfico 9: Intensidade de Cor (K/S) ao Longo dos Reúsos

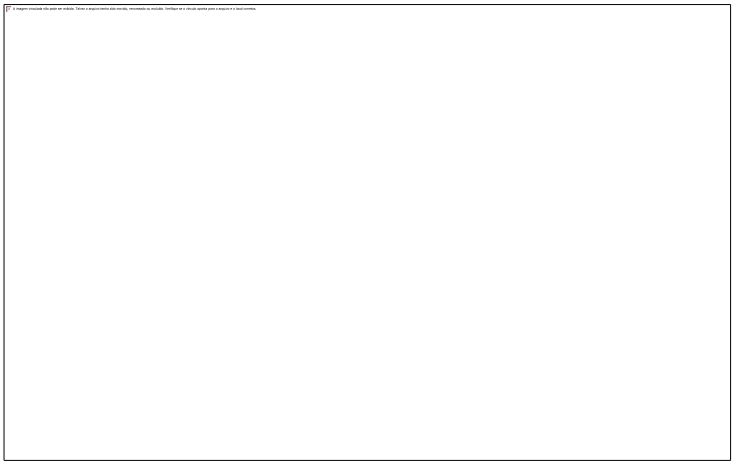


Gráfico 10: Emissão de Carbono (kg CO2-Eq)

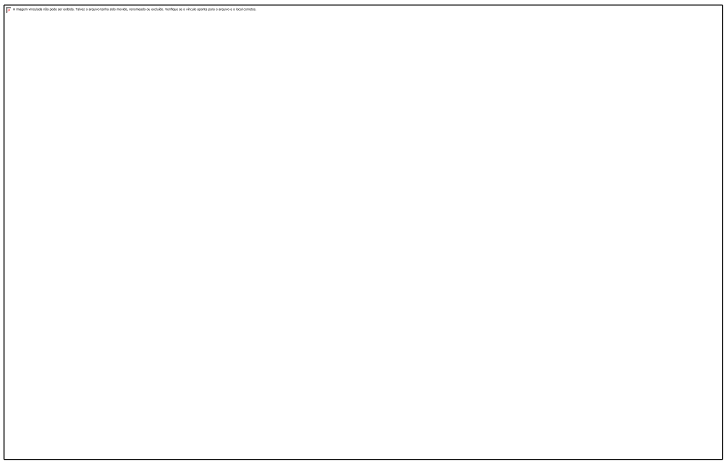


Gráfico 11: Balanço e Uso de Água (m^3)

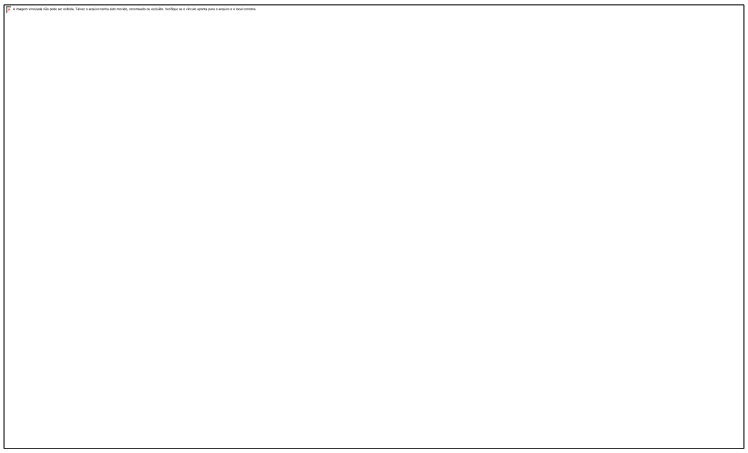


Gráfico 12: Toxicidade Humana Não-Cancerígena (CTUh)

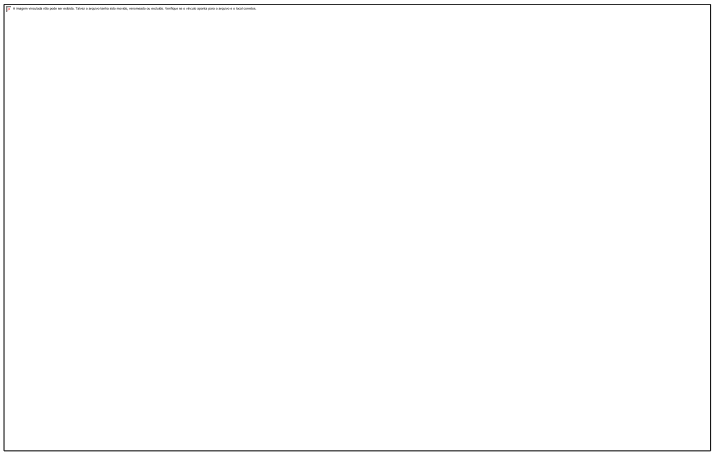


Gráfico 13: Ecotoxicidade em Água Doce (CTUe)

CÓDIGO: ET1631

AUTOR: RHYAN BELARMINO VANDERLEY

ORIENTADOR: RONAI MACHADO LISBOA

TÍTULO: Prototipagem e inovação com internet das coisas aplicados aos experimentos didáticos

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema eletrônico de baixo custo para medidas cinemáticas em um trilho de ar, concebido como atividade interdisciplinar de Iniciação Científica envolvendo Física, eletrônica, programação e internet das coisas. O protótipo utiliza um microcontrolador ESP32, sensores ópticos LM393 ou WCMCU HC-020K e um acelerômetro MPU6050 instalados no carrinho. As transições entre franjas escuras e lacunas claras de uma régua fixa são registradas em microssegundos, processadas pelo ESP32 e disponibilizadas em uma interface web e em arquivos CSV. Foram analisados 20 ensaios nos planos horizontal e inclinado, com diferentes sensores, portas de aquisição e larguras de franjas. Os resultados revelaram uma assimetria sistemática entre as transições claro–escuro e escuro– claro. Nos ensaios horizontais com o WCMCU e regiões de 2,5 cm, os tempos das franjas escuras foram, em média, 10,39% menores que os das lacunas claras. Verificou-se que medidas entre bordas homólogas reduzem esse efeito e fornecem resultados mais consistentes para velocidade e aceleração. O sistema constitui uma alternativa aos equipamentos proprietários e uma plataforma para o ensino de instrumentação científica e programação.

Palavras-chave: ESP32; photogate; trilho de ar; instrumentação científica;

TITLE: Prototyping and innovation with the Internet of Things applied to educational experiments

Abstract

This work presents the development of a low-cost electronic system for kinematic measurements on an air track, conceived as an interdisciplinary scientific initiation activity involving physics, electronics, programming, and the Internet of Things. The prototype employs an ESP32 microcontroller, LM393 or WCMCU HC-020K optical sensors, and an MPU6050 accelerometer mounted on the cart. Transitions between dark stripes and clear gaps on a fixed periodic ruler are recorded in microseconds, processed by the ESP32, and made available through

a web interface and CSV files. Twenty trials were analyzed on horizontal and inclined tracks using different sensors, acquisition ports, and stripe widths. The results revealed a systematic asymmetry between light-to-dark and dark-to-light transitions. In the horizontal trials using the WCMCU sensor and (2.5\ \text{cm}) regions, the dark-stripe passage times were, on average, (10.39%) shorter than those measured across the clear gaps. Measurements between homologous edges were found to reduce this effect and provide more consistent velocity and acceleration results. The system represents an alternative to proprietary equipment and a platform for teaching scientific instrumentation and programming.

Keywords: ESP32; photogate; air track; scientific instrumentation;

Introdução

Sensores de barreira de luz são amplamente utilizados em laboratórios didáticos para determinar tempos de passagem e, a partir deles, velocidade, aceleração, momento linear e energia cinética [1,2]. Equipamentos comerciais apresentam boa resolução temporal, mas seu custo limita o número de sensores por bancada e, consequentemente, a quantidade de pontos obtidos em uma única passagem do carrinho [3].

Em um primeiro trabalho, Fernandes e Lisboa [4] investigaram sensores luminosos conectados ao Arduino e a aquisição de dados por planilha eletrônica. Foram avaliadas grades com diferentes larguras de franjas claras e escuras, estabelecendo-se a viabilidade de um photogate de baixo custo [5,6]. O protótipo ainda era cabeado e sensível à iluminação ambiente.

Posteriormente, Vanderley e Lisboa [7] substituíram o Arduino pelo ESP32, incorporaram alimentação por bateria, comunicação Wi-Fi e uma página web embarcada. O sensor passou a deslocar-se com o carrinho diante de uma régua fixa, permitindo numerosas marcações ao longo de um único movimento.

O aperfeiçoamento da eletrônica, contudo, não elimina as limitações próprias de um fotodetector real. Mosca e Ertel [8] mostraram que a largura efetiva de uma franja depende do sensor, da posição transversal, do alinhamento, da velocidade e dos tempos assimétricos de resposta, correspondentes aos tempos de entrada e saída da franja no sensor. Edmiston [9] destacou que a largura finita do feixe e a histerese do circuito fazem as transições claro-escuro e escuro-claro ocorrerem em posições distintas, produzindo encurtamento ou alongamento aparente da região opaca. A solução recomendada é realizar a medição entre duas transições do mesmo tipo (homólogas).

Wolbeck [10], por sua vez, mostrou que, em movimento acelerado, a velocidade média $L/\Delta t$ deve ser associada a um centro de velocidade que não coincide necessariamente com o centro geométrico da bandeira. Essas observações são particularmente relevantes para uma régua periódica, pois uma borda deslocada reduz o intervalo atribuído a uma franja e aumenta o intervalo vizinho.

Assim, o presente trabalho descreve a configuração atual do protótipo, incorpora o acelerômetro MPU6050 a fim de detectar mudança de sentido em uma colisão e avalia experimentalmente a assimetria entre regiões claras e escuras, comparando sensores, portas de aquisição, larguras de franja e condições horizontal e inclinada.

Em cada ensaio, os tempos associados às sucessivas bordas da régua são utilizados para calcular as velocidades médias nas franjas escuras, nas lacunas claras e entre bordas homólogas. A evolução dessas velocidades ao longo do movimento permite determinar a aceleração do carrinho e comparar os resultados obtidos com diferentes sensores, portas de aquisição, larguras de franja e inclinações do trilho.

Metodologia

2. Materiais, técnicas e métodos

2.1 Montagem experimental

A Figura 1 apresenta o protótipo instalado sobre o trilho de ar. O microcontrolador ESP32, o sensor óptico (LM393 ou WCMCU) e o acelerômetro MPU6050 foram fixados ao carrinho, juntamente com o módulo de alimentação por bateria. A régua periódica foi mantida fixa e paralela à direção do movimento, atravessando a abertura existente entre o emissor e o receptor do sensor óptico. Dessa forma, o deslocamento do carrinho produz sucessivas transições entre as franjas escuras e claras, identificadas como bordas e registradas temporalmente pelo ESP32.

Os experimentos foram realizados com o trilho nas configurações horizontal e inclinada. No plano horizontal, o carrinho foi colocado em movimento ao longo do trilho, e os tempos de passagem foram utilizados para avaliar a uniformidade do movimento e investigar diferenças sistemáticas entre as transições claro–escuro e escuro–claro. Como a resistência ao movimento é reduzida pelo colchão de ar, esperava-se uma aceleração residual próxima de zero. Essa configuração também permitiu comparar os resultados obtidos com os sensores LM393 e WCMCU.

No plano inclinado, uma das extremidades do trilho foi elevada, produzindo uma diferença de altura de 95 mm ao longo de um comprimento de 2000 mm. A inclinação correspondente foi de 2,723°, para a qual a componente da aceleração gravitacional paralela ao trilho é de 0,464 m/s² [11]. Nessa configuração, foram utilizadas réguas com diferentes larguras de franjas claras e escuras, com o objetivo de determinar a posição, a velocidade e a aceleração do carrinho e avaliar a influência da geometria da régua e do modo de aquisição sobre os resultados.

Em ambas as configurações, a primeira borda detectada, B0, definiu a origem temporal (t = 0). As bordas seguintes foram numeradas sequencialmente até a interrupção da aquisição pelo usuário. Os dados foram processados pelo ESP32, apresentados em uma página HTML hospedada pelo próprio microcontrolador e exportados em arquivos CSV para análise posterior.

Figura 1 – Montagem experimental no trilho de ar, mostrando o carrinho com o microcontrolador ESP32, o sensor óptico, o acelerômetro MPU6050 e o módulo de alimentação. A régua periódica permanece fixa ao longo do trilho e atravessa a abertura do sensor durante o movimento do carrinho. Os ensaios foram realizados com o trilho nas configurações horizontal e inclinada.

2.2 Hardwares e conexões

O protótipo consiste em um emissor e um receptor de luz posicionados próximos um ao outro em um único módulo, utilizado como sensor de velocidade. Quando ocorre a interrupção do feixe infravermelho por uma sequência de franjas escuras intercaladas com franjas claras, as transições do sinal são detectadas e os respectivos tempos são registrados.

Na Figura 2, são apresentados os principais componentes utilizados no protótipo: o microcontrolador ESP32; o sensor de velocidade LM393, que possui portas digital (D0) e analógica (A0) e uma ranhura de 5 mm pela qual passam as franjas claras e escuras; o sensor de velocidade WCMCU HC-020K, que possui apenas uma porta digital (OUT) e uma ranhura de 5,9 mm; e o módulo MPU6050, equipado com acelerômetros e giroscópios triaxiais.

(a) (b) (c) (d)

Figura 2 – (a) Microcontrolador ESP32, modelo WROOM-32, com Wi-Fi e Bluetooth e módulo para bateria. (b) Sensor de velocidade LM393, com emissor e receptor ópticos. (c) Sensor de velocidade WCMCU HC-020K, com emissor e receptor ópticos. (d) Módulo MPU6050, com acelerômetro e giroscópio triaxiais. Fonte: Google.com.

O ESP32 desempenha duas funções principais: realizar a leitura das variações de tensão associadas à interrupção do feixe luminoso e transferir os registros para o computador por meio de comunicação sem fio [12]. O registro dos tempos foi realizado utilizando o temporizador de alta resolução do ESP32, acessado pela função esp_timer_get_time(). Essa função fornece os instantes de ocorrência em microssegundos, permitindo determinar os intervalos entre as sucessivas bordas claras e escuras detectadas pelos sensores.

Na Figura 3, é apresentado o circuito eletrônico utilizado no protótipo. O firmware permite selecionar três modos exclusivos de aquisição óptica: LM393-D0, LM393-A0 ou WCMCU-OUT. Nos modos digitais, os sinais D0 ou OUT são conectados ao GPIO25, configurado como INPUT_PULLUP. No modo analógico, o sinal A0 é conectado ao GPIO34, com tensão limitada a 3,3 V, e a detecção é realizada por meio de limiar, média móvel e confirmação temporal.

O MPU6050 é conectado ao barramento I²C no endereço 0x68, com SDA conectado ao GPIO21 e SCL ao GPIO22. O botão opcional utiliza o GPIO4. O LM393 é alimentado em 3,3 V, garantindo compatibilidade direta com o ESP32. O WCMCU HC-020K é alimentado em 5 V, mas sua saída deve ser tratada como coletor aberto, com elevação lógica para 3,3 V; portanto, não se deve aplicar diretamente uma tensão de 5 V ao GPIO25.

O ESP32 cria a rede local denominada ESP32-Trilho, hospeda o dashboard de aquisição, registra até 128 bordas ópticas e armazena até 500 amostras provenientes do MPU6050, adquiridas nominalmente a cada 10 ms.

Figura 3 – Esquema elétrico atualizado do protótipo, incluindo as alternativas de aquisição com os sensores LM393 e WCMCU e o acelerômetro MPU6050. O modo de aquisição óptica é selecionado pelo firmware, enquanto os dados do MPU6050 são adquiridos em paralelo. Fonte: elaboração própria, com auxílio de inteligência artificial.

Resultados e Discussões

3.1. Plano horizontal: régua de 2,5 cm

A Tabela 1 apresenta os registros dos instantes de tempo para três ensaios com o carrinho se movendo sobre o trilho de ar e a régua no plano horizontal. Os instantes são registrados e apresentados na página HTML à medida que cada borda da régua com franjas claras e escuras com comprimentos igualmente espaçados de 2,5 cm passa pelo sensor WCMCU.

Tabela 1. Registros dos tempos de passagem do carrinho no plano horizontal utilizando uma régua com franjas claras e escuras com comprimento igualmente espaços de 2,5 cm.

A partir dos dados da Tabela 1 é possível computar os intervalos de tempo ao longo de cada franja escura e clara consecutivas. Na Tabela 2, a média desses intervalos de tempo nas regiões escuras foram 29,12, 29,28 e 30,25 ms; nas franjas claras, 32,33, 32,49 e 33,55 ms. A assimetria (At) foi 10,43%, 10,37% e 10,35%, respectivamente, com média 10,39% e dispersão de apenas 0,04 ponto percentual. A aceleração residual ajustada ficou entre 0,005 e 0,008 m/s², mostrando que a diferença não é produzida pela aceleração do carrinho.

Tabela 2. Intervalos de tempos de passagem no plano horizontal com uma régua com franjas claras e escuras com comprimento igualmente espaços de 2,5 cm

A assimetria existente quando a passagem se dá em uma transição claro-escuro ou escuro-claro pode ser minimizada considerando o tempo de passagem entre bordas homólogas. A Tabela 3, apresenta os intervalos de tempo para cada ensaio entre o início de bordas escura-escura e clara-clara.

Tabela 3. Intervalos de tempos de passagem no plano horizontal com uma régua com franjas claras e escuras com comprimento igualmente espaços de 2,5 cm.

A Tabela 3 apresenta os intervalos medidos entre bordas homólogas consecutivas, isto é, entre os inícios de duas franjas escuras (EE) ou de duas lacunas claras (CC). Os valores médios de EE foram 61,46, 61,77 e 63,81 ms, enquanto os valores de CC foram 61,45, 61,75 e 63,78 ms, respectivamente. As assimetrias residuais entre os tempos médios EE e CC foram 0,022%, 0,036% e 0,039%, permanecendo inferiores a 0,04% nos três ensaios, demonstrando que o efeito sistemático observado entre as regiões escuras e claras é praticamente cancelado quando os intervalos são definidos por transições de mesma polaridade. Assim, o uso de bordas homólogas reduz a assimetria relativa em cerca de duas a três ordens de grandeza. O sinal positivo da Tabela 3 apenas indica que a média EE ficou ligeiramente maior que a média CC.

Figura 6 – Posição do carrinho em função do tempo nos três ensaios realizados no plano horizontal com o sensor WCMCU HC-020K. Os símbolos representam os dados experimentais, e as linhas correspondem aos ajustes pela equação do movimento retilíneo uniformemente variado.

A Figura 6 apresenta os ajustes dados dos três ensaios da Tabela 1. Para cada ensaio foi realizado um ajuste a posição em função do tempo utilizando o modelo dado pela equação 5, a fim de avaliar se o valor da aceleração é significativo.

Tabela 4. Parâmetros dos ajustes da equação 5 para o movimetno no plano horizontal com uma régua com franjas claras e escuras com comprimento igualmente espaços de 2,5 cm

A Tabela 4, mostra que para todos os ensaios a posição inicial é compatível com zero e a velocidade é constante. A aceleração residual ajustada ficou entre 0,005 e 0,008 m/s², mostrando que a diferença não é produzida pela aceleração do carrinho, confirmando que o movimento no plano horizontal foi essencialmente uniforme.

Supondo que a velocidade do carrinho permaneça praticamente constante durante uma sequência escura–clara e que cada período da régua possui Ltotal = 5,0 cm, as larguras efetivas são distribuídas proporcionalmente aos tempos,

$$L_{E,ef} = 5{,}0 \times \Delta t_E / (\Delta t_E + \Delta t_C)$$

$$L_{C,ef} = 5{,}0 \times \Delta t_C / (\Delta t_E + \Delta t_C)$$

onde a partir da última linha Tabela 3, os valores médios são: Δt_E = 29,55 ms e Δt_C = 32,79 ms. Então, $L_{E,ef}$ = 2,37 cm e $L_{C,ef}$ = 2,63 cm e com soma constante Ltotal = 5,0 cm. A largura efetiva média foi 2,37 cm para as franjas escuras e 2,63 cm para as lacunas claras. Portanto, uma franja geométrica de 2,5 cm comporta-se como se estivesse encurtada em aproximadamente 1,30 mm, enquanto a lacuna recebe o mesmo acréscimo, pois esses resultados caracterizam um deslocamento sistemático das bordas ópticas, e não um erro no comprimento total da régua ou um efeito da aceleração do carrinho. O

resultado é comparável à ordem de 1 mm discutida por Edmiston [14] e à variação de comprimento efetivo observada por Mosca e Ertel [12].

3.2. Plano inclinado: LM393

No plano inclinado, a aceleração torna os intervalos de tempo sucessivos menores. Para larguras iguais, esse efeito isolado faria a primeira metade de cada período apresentar tempo ligeiramente maior que a segunda. A correção pela velocidade local permite avaliar a largura efetiva e evidencia que a alternância observada excede a contribuição cinemática.

Tabela 5 - Tempos e larguras efetivas para o LM393 no plano inclinado. E: escura; C: clara. Valores recalculados diretamente dos tempos das bordas.

A Tabela 5, mostra que no modo analógico (A0), a franja escura apresentou tempo maior que a lacuna clara. A assimetria diminuiu de +22,60% para +16,46% quando L aumentou de 0,4 para 1,5 cm. Esse comportamento é oposto ao da saída digital (D0), para a qual a franja escura de 2,5 cm apresentou tempo aproximadamente 9,9% menor. A inversão indica que A0 e D0 não marcam a mesma posição física: o comparador digital, sua histerese, o limiar analógico, a filtragem e as inclinações diferentes do sinal de subida e descida constituem cadeias de medição distintas.

A dependência relativa com a largura também é consistente com a literatura: um deslocamento espacial aproximadamente fixo produz erro percentual maior em uma franja curta [12,14]. Por isso, os intervalos individuais escuro e claro são úteis para caracterizar o sensor, mas não devem ser adotados isoladamente como resultado cinemático principal.

3.3. Bordas homólogas e aceleração

A Tabela 6 sintetiza as acelerações obtidas no plano inclinado a partir das sequências de bordas homólogas escura–escura (EE) e clara–clara (CC). Essa forma de análise evita combinar transições de polaridades opostas e permite avaliar em que medida o deslocamento da posição de comutação afeta a determinação da aceleração.

Tabela 6 - Acelerações obtidas separadamente pelas sequências de bordas homólogas EE e CC.

Para as réguas de 2,5 cm, as acelerações determinadas pelas sequências EE e CC permaneceram próximas. As diferenças relativas foram de 4,0% para o WCMCU–OUT e 3,5% para o LM393–D0. Esses resultados mostram que o deslocamento aproximadamente constante da posição de comutação tende a se cancelar quando o início e o fim do intervalo são definidos por transições de mesma polaridade, conforme discutido por Mosca e Ertel [12] e pelo princípio da bandeira dupla apresentado por Edmiston [14].

No modo analógico do LM393, a concordância entre as acelerações EE e CC diminuiu com a redução da largura das regiões. Para a régua de 1,5 cm, foram

obtidos 0,438 e 0,531 m/s², correspondendo a uma diferença relativa de 19,2%. No único ensaio com a régua de 0,4 cm, a diferença atingiu 35,3%. Nesse caso, a largura reduzida das franjas, o número limitado de períodos, a filtragem do sinal analógico e a maior razão entre o deslocamento do limiar e a largura geométrica tornam as acelerações mais sensíveis à posição efetiva das bordas.

Figura 7 – Posição do carrinho em função do tempo nos ensaios realizados no plano inclinado com: (a) o sensor LM393 e régua com franjas de 0,4 cm, (b) os três ensaios para sensor LM393 e régua com franjas de 1,5 cm, (c) um ensaios com o sensor LM393 e dois ensaios com o sensor WCMCU e régua com franjas de 2,5 cm. Os símbolos representam os dados experimentais, e as linhas correspondem aos ajustes pela equação do movimento retilíneo uniformemente variado.

A Figura 7, representa os dados obtidos para o movimento acelerado para as configurações mostradas na Tabela 5. O gráfico 6.(a) corresponde ao ajuste dos dados para a régua com franjas de 0,4 cm. O gráfico 6.(b) aos dados para a régua com franjas de 1,5 cm onde foram feitos 3 ensaios. O gráfico 6.(c) é o ajuste para a régua com franjas de 2,5 cm onde foram feitos 3 ensaios.

Tabela 7 - Acelerações obtidas separadamente pelas sequências de bordas homólogas EE e CC.

Na Tablea 7, apesar da diferença entre os resultados EE e CC, a média das duas determinações permanece próxima da aceleração obtida pelo ajuste direto de (x(t)) à equação do MRUV. Para 1,5 cm, a média das acelerações homólogas é 0,485 m/s², enquanto o ajuste das três trajetórias fornece (0,482 ± 009) m/s². Para 2,5 cm, o LM393–D0 fornece uma média de 0,462 m/s², em concordância com (0,4612± 0011) m/s² obtido pelo ajuste das curvas (x(t)). Portanto, a média entre as sequências EE e CC recupera adequadamente a aceleração global, mesmo quando as determinações individuais apresentam diferenças sistemáticas.

A aceleração esperada no plano inclinado foi calculada a partir das dimensões do trilho com uma régua com incerteza instrumental de 0,5 mm. A diferença de altura entre suas extremidades foi DH = H – h = (95,0 ± 0,7) mm, enquanto o comprimento inclinado foi L = (2000,0 ± 0,5) mm. Assim, obteve-se sin q = DH /L = (0,0475 ± 0,0004), correspondente a q = (2,72 ± 0,02)°. A componente da aceleração gravitacional paralela ao trilho fornece aesperado = g sen q ≈ (0,464 ± 0,004) m/s². A média das acelerações EE e CC obtida com o LM393–D0 e a régua de 2,5 cm foi 0,462 m/s², apenas 0,5% abaixo da previsão. Para o WCMCU–OUT, a diferença foi de 2,0%. Nos ensaios analógicos com o LM393–A0, as diferenças foram de 4,3% para a régua de 1,5 cm e 3,5% para a régua de 0,4 cm. Apesar das assimetrias entre as determinações EE e CC, as médias permanecem próximas da aceleração prevista pela geometria do trilho.

Conclusão

O sistema baseado em ESP32 amplia os protótipos anteriores [7,10] ao integrar aquisição óptica selecionável, acelerômetro MPU6050, alimentação embarcada, comunicação Wi-Fi, dashboard e exportação CSV. A régua periódica permite dezenas de marcações com um único sensor móvel, reduzindo a necessidade de reposicionar photogates ao longo do trilho.

Os ensaios demonstram, contudo, que larguras geométricas iguais não produzem tempos iguais. No WCMCU digital e no LM393 digital, a região escura é efetivamente encurtada; no WCMCU com o trilho e régua na horizontal, 2,5 cm comportam-se como aproximadamente 2,37 cm e a lacuna como 2,63 cm. A estabilidade do efeito no plano horizontal comprova sua origem instrumental. No LM393 analógico, a assimetria se inverte e cresce em termos relativos para franjas menores, evidenciando a influência do limiar e do processamento do sinal.

A medida recomendada para velocidade e aceleração é, portanto, aquela realizada entre bordas homólogas: escura–escura e clara–clara. Os intervalos individuais devem ser preservados para diagnóstico e calibração, não combinados indiscriminadamente como se representassem larguras ideais. Como continuidade, devem ser repetidos os ensaios horizontais com o LM393, controladas a iluminação e a distância régua-detector, medidos os perfis A0 de subida e descida do sinal elétrico confrontadas as acelerações ópticas com as componentes do MPU6050.

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] CARVALHO NETO, J. T.; 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. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0166.

[2] 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. DOI: 10.1590/S0102-47442007000200014.

[3] PHYWE. Equipamentos para ensino de física. Disponível em: https://www.phywe.com. Acesso em: 27 ago. 2024.

[4] 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, eCIC, 2024.

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

[6] SOMOGYI, A.; KELEMEN, A.; MINGESZ, R. Low-cost high-resolution measurements of periodic motions with Arduino in physics teacher in-service education. Journal of Physics: Conference Series, v. 2297, 012031, 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2297/1/012031.

[7] VANDERLEY, R. B.; LISBOA, R. Prototipagem e inovação com internet das coisas. In: XXXVI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica, eCICT, 2025.

[8] MOSCA, E. P.; ERTEL, J. P. Photogates: an instrument evaluation. American Journal of Physics, v. 57, n. 9, p. 840-844, 1989. DOI: 10.1119/1.15906.

[9] EDMISTON, M. D. Using double-flags for photogate timing. Bluffton University, 1986; rev. 2005.

[10] WOLBECK, J. Instantaneous velocity using photogate timers. The Physics Teacher, v. 48, n. 4, p. 262-263, 2010. DOI: 10.1119/1.3361999.

[11] BEZERRA, A. B.; BARROS, R. F. E.; BESSA, A.; 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, e20230075, 2023. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0075.

[12] ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 series. Disponível em: https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32. Acesso em: 27 ago. 2024.

[13] INVENSENSE. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. Revision 3.4, document PS-MPU-6000A-00, 19 ago. 2013.

[14] BESSA, A.; FERREIRA, P. C.; LISBOA, R. Optimizing acceleration measurements using a single photogate. European Journal of Physics, v. 42, 055003, 2021. DOI: 10.1088/1361-6404/abeafd.

Anexos



Página 1



Página 2





















CÓDIGO: ET1648

AUTOR: IVAN VINÍCIUS DE OLIVEIRA LOPES

ORIENTADOR: JOSE HENRIQUE FERNANDEZ

TÍTULO: O OVNE está no "ar": Expandindo e mantendo o site do Observatório de Valores do Nordeste

Resumo

Este trabalho apresenta as atividades desenvolvidas como bolsista do Observatório de Valores do Nordeste (OVNE), projeto vinculado à Escola de Ciências e Tecnologia (ECT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). As atividades envolveram a produção e publicação de matérias no site, a manutenção e acompanhamento de seu funcionamento, a gestão do perfil do projeto no Instagram e a organização dos Encontros com o OVNE. Também são apresentados os resultados obtidos durante o período, incluindo a quantidade de conteúdos publicados, o alcance das atividades e a participação de profissionais convidados nos eventos. A partir da experiência adquirida, foram identificadas limitações na estrutura, no código-fonte e no alcance do projeto, sendo propostas melhorias futuras, como a reformulação visual e estrutural do site, a implementação de um sistema de monitoramento de acessos, a expansão do sistema de busca por localização e a reorganização do código-fonte. Por fim, são discutidas estratégias para ampliar a frequência de publicações e alcançar um público além do ambiente acadêmico.

Palavras-chave: OVNE; divulgação científica; aeroespacial; desenvolvimento web; UFRN

TITLE: OVNE is on the "air": Expanding and maintaining the Observatório de Valores do Nordeste website

Abstract

This work presents the activities developed as a scholarship student at the Observatório de Valores do Nordeste (OVNE), a project linked to the School of Science and Technology (ECT) of the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN). The activities involved the production and publication of articles on the website, maintenance and monitoring of its operation, management of the project's Instagram profile, and organization of the Encontros com o OVNE. The results obtained during the period are also presented, including the amount of published content, the reach of the activities, and the participation of invited professionals in the events. Based on the experience acquired, limitations were identified in the website's structure, source code,

and reach. Future improvements are proposed, including a visual and structural redesign of the website, implementation of an access monitoring system, expansion of the location-based search system, and reorganization of the source code. Finally, strategies to increase the frequency of publications and reach an audience beyond the academic environment are discussed.

Keywords: OVNE; science communication; aerospace; web development; UFRN

Introdução

Introdução

O Brasil, apesar de sua localização privilegiada, próxima à linha do Equador, ainda ocupa uma posição de pouco destaque no cenário aeroespacial mundial, representando apenas 0,04% do orçamento espacial global e ocupando o segundo menor investimento em setor espacial entre os países do G20 (CNI, 2025). É notável que a falta de investimentos na área venha nos privando de diversos benefícios e possibilidades que muitos países desenvolvidos possuem, como a autonomia para o lançamento de foguetes, o desenvolvimento de sistemas próprios de telecomunicações e o monitoramento ambiental e climático. Um país do tamanho do Brasil tem uma necessidade ainda maior de monitoramento via satélite (fiscalização ambiental, agricultura, fronteiras) do que países menores.

Além disso, as árduas conquistas do país nesse cenário nem sempre são totalmente nacionais. Atualmente, o Brasil possui cerca de 13 a 16 satélites próprios ou operados em parceria direta (EXAME, 2023). Entretanto, nenhum deles foi colocado em órbita de forma completamente autônoma pelo país, principalmente pelo fato de o Brasil ainda não possuir um veículo lançador nacional capaz de lançar objetos ao espaço de forma independente.

Ainda assim, o território brasileiro conta com dois centros de lançamento funcionais: o Centro Espacial de Alcântara (CEA) e o Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) (AEB, [20--]; AEROIN, 2024). Esse cenário se torna ainda mais relevante quando analisado sob uma perspectiva regional. A velocidade de rotação da Terra é maior nas regiões próximas à linha do Equador, proporcionando ao foguete uma espécie de "carona" natural durante o lançamento e, consequentemente, facilitando a entrada em órbita.

O Norte do Nordeste brasileiro está localizado relativamente próximo à linha do Equador e apresenta características que podem favorecer as atividades espaciais. Entre elas, destacam-se o regime de ventos e chuvas relativamente bem definido, favorável às operações espaciais durante grande parte do ano, além da menor densidade de rotas aéreas e marítimas comerciais quando comparada a regiões como a Europa e a América do Norte. Essas características tornam a região estratégica para lançamentos espaciais. Apesar desse potencial, o Nordeste não possui o devido investimento: o Brasil possui apenas 7 instituições com graduação em Engenharia Aeroespacial (AEB, 2020), dentre elas apenas 1 no Nordeste, a Universidade Federal do Maranhão (UFMA) (UFMA, [20--]). Além das graduações, existem apenas 3 pós-graduações na área no país, duas em São José dos Campos (SP), no DCTA, ligadas ao ITA/IAE (ITA, [20--]), e apenas 1 no

Nordeste: a RNA (Rede Nordeste Aeroespacial), programa em rede envolvendo UFRN, UFPE, UFMA e UEMA (UFMA, [20--]). Isso reforça a centralização da pós-graduação fora do Nordeste.

Diante desse cenário, surge o Observatório de Valores do Nordeste (OVNE), projeto vinculado à Escola de Ciências e Tecnologia (ECT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O projeto tem como objetivo demonstrar à população brasileira e ao mundo a importância do desenvolvimento do setor aeroespacial nacional e, especialmente, das potencialidades do Nordeste brasileiro nessa área. Para isso, o OVNE utiliza diferentes meios de divulgação científica e tecnológica, como um site com matérias informativas, publicações em redes sociais e palestras com profissionais dispostos a compartilhar seus conhecimentos com pessoas interessadas no cenário aeroespacial.

Como bolsista do projeto, sou responsável pela manutenção do site, pela publicação das matérias, pela produção e publicação de posts no Instagram e pela organização dos Encontros com o OVNE, em conjunto com meu orientador e meu companheiro de bolsa.

Este trabalho tem como objetivo apresentar as atividades desenvolvidas e os resultados obtidos no âmbito do projeto desde dezembro de 2025.

Metodologia

Metodologia

Produção e publicação das matérias

Após o orientador e o bolsista parceiro definirem o tema da matéria, o outro bolsista fica responsável pela elaboração do texto, pela escolha das fotografias e pela definição dos títulos. Na produção da matéria, busca-se estruturar o conteúdo de forma organizada, geralmente dividindo-o em resumo, introdução, desenvolvimento e conclusão.

Depois da elaboração inicial, a matéria é repassada para mim. Faço a leitura completa do texto, realizando sugestões e pequenos ajustes quando necessário. Em seguida, seleciono as imagens que apresentam melhor resolução para serem utilizadas no site, procurando outras adequadas ao conteúdo caso a quantidade e qualidade sejam insuficientes.

Com o fim dessa etapa, a matéria é encaminhada ao orientador para avaliação. Ele realiza as últimas alterações necessárias e o texto retorna para mim com as modificações, caso eu identifique algum ponto que ainda precise ser ajustado, informo o orientador para finalizarmos os ajustes antes da publicação.

Com a versão final da matéria definida e as imagens selecionadas, inicio o processo de publicação: acesso o endereço ovne.ect.ufrn.br/controller nos quais tem abas de

Matérias, Notícias e Vídeos, entro na aba Matérias, onde estão armazenadas todas as matérias publicadas no site, e seleciono a opção de adicionar uma nova matéria.

O primeiro passo é definir o título da matéria, geralmente acordado entre mim e o outro bolsista. Em seguida, é elaborado um breve resumo, que pode ser produzido por mim ou pelo outro bolsista, quando essa tarefa fica sob minha responsabilidade, utilizo o arquivo original da matéria como base e recorro ao ChatGPT seguindo um prompt previamente definido e armazenado, escolhido por apresentar resultados mais eficientes e coerentes com o conteúdo produzido.

Depois, são inseridos os autores da matéria, seguindo sempre a ordem Gabriel Cabral, Ivan Vinícius e José Henrique Fernandez, ordem definida pelo orientador com o objetivo de prestigiar o autor principal e os demais envolvidos na produção. Em seguida, seleciono uma das imagens para ser utilizada como capa da matéria, geralmente buscando na internet uma imagem relacionada ao tema abordado.

Após a definição da capa, passo para o corpo da matéria: na aba correspondente, insiro o tópico do texto, sempre definido pelo autor principal, e copio o conteúdo do arquivo original para o campo destinado. Durante essa etapa, utilizo comandos em HTML para aplicar formatações de negrito e itálico e, quando necessário, inserir links para páginas externas de organizações ou pessoas citadas na matéria, facilitando a identificação de informações relevantes pelo leitor.

Por fim, acesso a aba de imagens, insiro os arquivos selecionados, adiciono as legendas (definidas por mim ou pelo autor da matéria, conforme quem escolheu a imagem) e as respectivas fontes, publicando a matéria em seguida. Após a publicação, o link é encaminhado ao orientador, que realiza uma última revisão para verificar se são necessárias alterações, caso alguma modificação seja solicitada, retorno à aba de matérias no Controller e utilizo a opção de edição.

Gestão do Instagram

Após a publicação de uma matéria no site, seleciono uma imagem, seja proveniente da própria matéria ou encontrada na internet, para ser utilizada em uma publicação no Instagram. Em seguida, elaboro uma legenda relacionada ao conteúdo e utilizo o ChatGPT para auxiliar na edição da arte.

Para manter uma identidade visual consistente, utilizo como referência uma primeira postagem que foi editada por mim. Envio à IA a imagem utilizada como modelo, a nova legenda, a imagem de fundo escolhida e a paleta de cores que deve ser seguida. A partir dessas informações, solicito que seja produzida uma nova arte semelhante à imagem utilizada como referência.

Após receber o resultado, analiso a imagem e solicito alterações sempre que necessário, até que ela esteja de acordo com o resultado desejado. Durante esse processo, também verifico se a inteligência artificial não realizou alterações ou modificações que não foram solicitadas, evitando erros ou elementos que possam comprometer a qualidade da publicação.

Manutenção do site

O site não foi desenvolvido por mim, mas pelo bolsista que ocupava a função anteriormente; possuo, entretanto, acesso ao código-fonte completo da plataforma. Como parte das atividades de manutenção, realizo verificações semanais no site e nas matérias publicadas, buscando identificar possíveis erros, links que não estejam funcionando ou outros problemas que possam comprometer seu funcionamento.

Em algumas situações, já foi necessário lidar com problemas causados por caracteres que o sistema do site não conseguiu interpretar corretamente, como o uso de ponto e vírgula (;) em títulos de matérias. Até o momento, não foram necessárias alterações diretamente no código-fonte; caso sejam necessárias, pretendo implementá-las e solicitar sua atualização nos servidores da UFRN, onde o site está hospedado.

Encontros com o OVNE

Também organizo, junto ao meu parceiro de bolsa, os Encontros com o OVNE. Os encontros são conversas abertas sobre a trajetória dos palestrantes, abordando suas funções, obstáculos, vínculos com a área aeroespacial e objetivos de carreira.

O orientador é responsável por realizar o contato com possíveis palestrantes, não havendo um número máximo previamente definido de convidados. Enquanto isso, eu e meu parceiro de bolsa ficamos responsáveis pela escolha do local e do horário do encontro.

Após a definição dessas informações, produzimos as publicações de divulgação para o Instagram e compartilhamos o material com pessoas e grupos interessados, buscando ampliar a divulgação do evento e alcançar o maior número possível de participantes.

Resultados e Discussões

Resultados

Seguindo a metodologia descrita, o site possui atualmente 17 matérias, 2 vídeos e 8 notícias publicadas, sendo 11 matérias e 2 notícias produzidas por mim e pelo meu parceiro de bolsa. O projeto já existia antes da minha entrada na bolsa, o que explica a diferença entre o número total de publicações disponíveis no site e a quantidade produzida durante o período em que participamos do projeto. Infelizmente, o site não possui um sistema de monitoramento de acessos que permita registrar informações sobre o tráfego e o número de visitantes.

O perfil do Instagram (@ovne.ufrn) possui, até o momento, 7 publicações, 49 seguidores e 190 curtidas. A biografia do perfil é: “Nossas lentes estão de olho nas atividades espaciais no Nordeste 🚀 🔭”. Das 7 publicações atuais, 4 foram produzidas com minha participação.

Os Encontros com o OVNE tiveram, até o momento, 2 edições. O evento era anteriormente denominado “Café a Vácuo”, mas posteriormente foi renomeado para

"Encontros com o OVNE". Participei da edição mais recente, realizada no IFRN – Campus Parnamirim, que contou com a participação de Credson Isaac, professor do IFRN, e Adriana Correa, da Agência Espacial Brasileira (AEB). O encontro contou com um público de aproximadamente 20 pessoas.

Discussão

Acredito que os resultados obtidos até o momento sejam positivos no âmbito acadêmico, visto que conseguimos alcançar pessoas vinculadas à UFRN e ao IFRN, além de produzir um volume considerável de matérias. Por outro lado, o crescimento do Instagram do projeto ainda é limitado, principalmente por se tratar de uma conta pequena, o que dificulta o alcance das publicações por meio dos mecanismos de recomendação da plataforma.

A participação de Adriana Correa, da Agência Espacial Brasileira (AEB), e de Credson Isaac, do IFRN, na edição mais recente dos Encontros com o OVNE representa uma conquista para o projeto, considerando a experiência e o conhecimento que ambos possuem para compartilhar com os participantes. Entretanto, o OVNE ainda apresenta pouco reconhecimento fora do ambiente universitário, visto que grande parte dos ouvintes e leitores é formada por pessoas vinculadas à Escola Agrícola de Jundiaí (EAJ), UFRN e IFRN.

Analisando esses resultados em conjunto, é possível perceber que o alcance do OVNE, tanto no Instagram quanto nos Encontros, ainda está concentrado no ambiente acadêmico. A divisão de tarefas entre os bolsistas tem funcionado de maneira satisfatória, principalmente pela boa relação que mantemos dentro e fora do ambiente universitário, o que facilita a colaboração e permite que um auxilie o outro durante a realização das atividades.

Como ponto de melhoria, pretendo contribuir de forma mais ativa na sugestão de temas e no incentivo ao meu parceiro de bolsa, buscando estabelecer uma meta de pelo menos duas matérias publicadas por semana. Aumentar a frequência de publicações pode contribuir não apenas para ampliar o conteúdo disponível no site, mas também para aumentar o alcance do Instagram e, consequentemente, a divulgação do projeto como um todo.

Conclusão

Conclusão

Com base nas atividades apresentadas, é possível afirmar que os principais objetivos da bolsa, produção e publicação de matérias, manutenção e gestão do site e do Instagram e organização dos Encontros com o OVNE, estão sendo cumpridos. As atividades realizadas contribuíram para a divulgação de informações relacionadas ao cenário aeroespacial, principalmente no ambiente acadêmico, além de proporcionarem

experiência prática nas áreas de produção de conteúdo, manutenção de sistemas e divulgação científica.

Ao longo do trabalho, foram identificados pontos que podem ser aprimorados. O site apresenta limitações em sua estrutura e funcionamento, enquanto o projeto ainda possui alcance restrito fora do ambiente acadêmico. Dessa forma, uma das principais perspectivas futuras é realizar uma reformulação completa do site, abrangendo seu aspecto visual, estrutura e funcionalidades.

Entre as mudanças previstas está a reformulação do sistema de busca por localização. Atualmente, o mapa-filtro utiliza o nome da região selecionada para encontrar matérias. A proposta é utilizar identificadores de localidade (flags) definidos durante a publicação. Assim, uma matéria relacionada a Parnamirim, por exemplo, receberá essa localidade como flag, permitindo que o sistema identifique sua região e apresente a matéria quando o usuário selecionar o Nordeste. Esse modelo também possibilitará a expansão do mapa para todo o território brasileiro, tornando a busca mais precisa e organizada.

Também será implementado um sistema de monitoramento de acessos, capaz de registrar as visitas ao site e às matérias. Dessa forma, será possível acompanhar o alcance dos conteúdos, identificar aqueles com maior número de acessos e realizar análises sobre a popularidade e o desempenho do site.

Outra mudança planejada é a reformulação da interface visual e da estrutura das matérias, buscando tornar o site mais moderno e oferecer maior liberdade na organização dos conteúdos, em vez de depender exclusivamente de campos predefinidos. Pretendo ainda facilitar a edição dos textos, automatizando a inserção de links e formatações como negrito e itálico, reduzindo a necessidade de comandos HTML manuais.

Também foi identificada a necessidade de reorganizar o código-fonte, que está pouco organizado e com excesso de linhas em algumas partes, dificultando sua manutenção e futuras alterações. Assim, será necessária uma reformulação do código, buscando torná-lo mais organizado, compreensível, eficiente e fácil de manter.

Por fim, pretendo ampliar minha participação na definição dos temas e colaborar de forma mais ativa com meu parceiro de bolsa na produção das matérias. Com isso, espera-se aumentar a frequência de publicações no site e no Instagram e, consequentemente, ampliar o alcance e a divulgação do OVNE para além do ambiente acadêmico.

Referências

Referencias

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: informação e documentação: referências: elaboração. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB). Observatório do Setor Espacial Brasileiro. Disponível em: https://observatorio.aeb.gov.br/. Acesso em: 29 ago. 2026.

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB). Engenharia Aeroespacial: a carreira do futuro. Gov.br, 24 nov. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/aeb/pt-br/assuntos/noticias/engenharia-aeroespacial-a-carreira-do-futuro. Acesso em: 29 ago. 2026.

AEROIN. Força Aérea Brasileira já realizou mais de 3 mil lançamentos no Centro de Lançamento da Barreira do Inferno. Aeroin, 27 nov. 2024. Disponível em: https://aeroin.net/forca-aerea-brasileira-ja-realizou-mais-de-3-mil-lancamentos-no-centro-de-lancamento-da-barreira-do-inferno/. Acesso em: 29 ago. 2026.

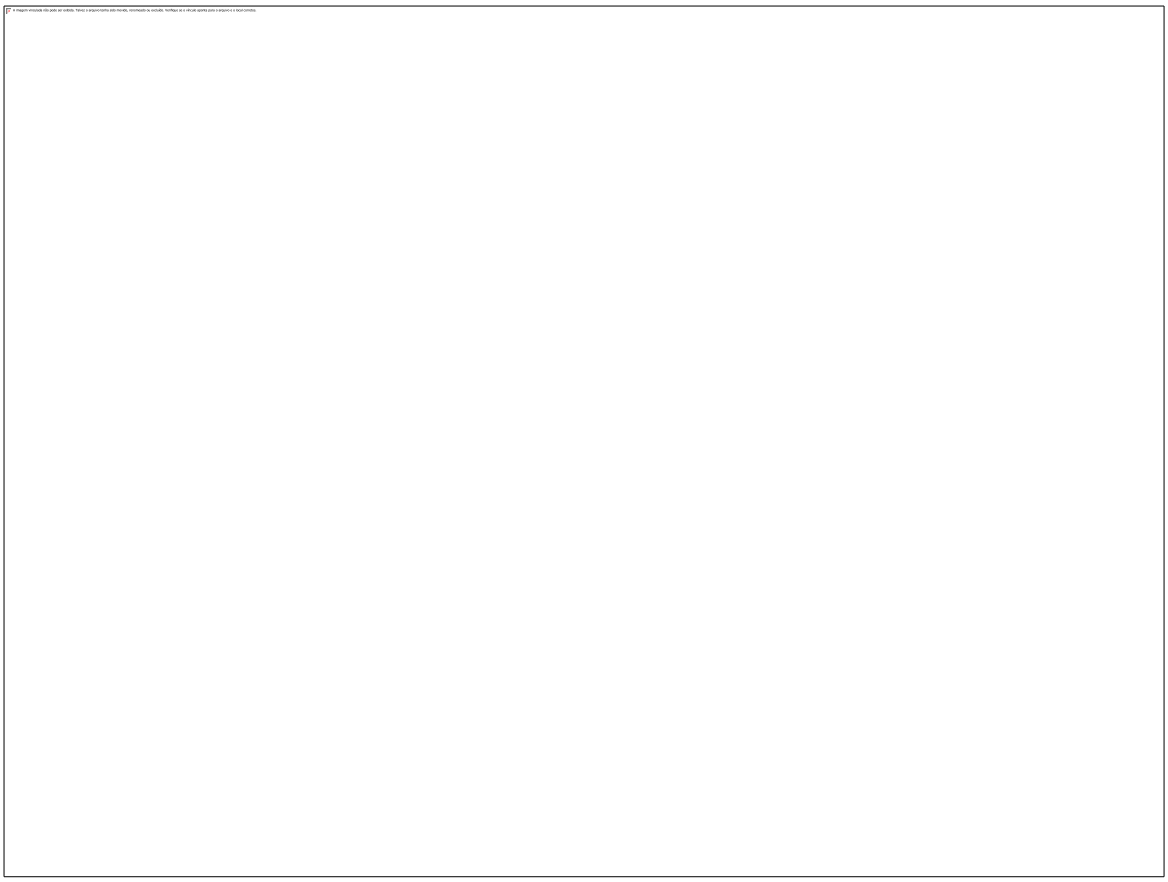
EXAME. Brasil tem satélites de ponta, mas precisa de planejamento para evitar obsolescência. Exame, 28 set. 2023. Disponível em: https://exame.com/bussola/porque-os-satelites-brasileiros-precisam-se-manter-atualizados/. Acesso em: 29 ago. 2026.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA (ITA). Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais (PG-CTE). Disponível em: https://www.cte.ita.br/. Acesso em: 29 ago. 2026.

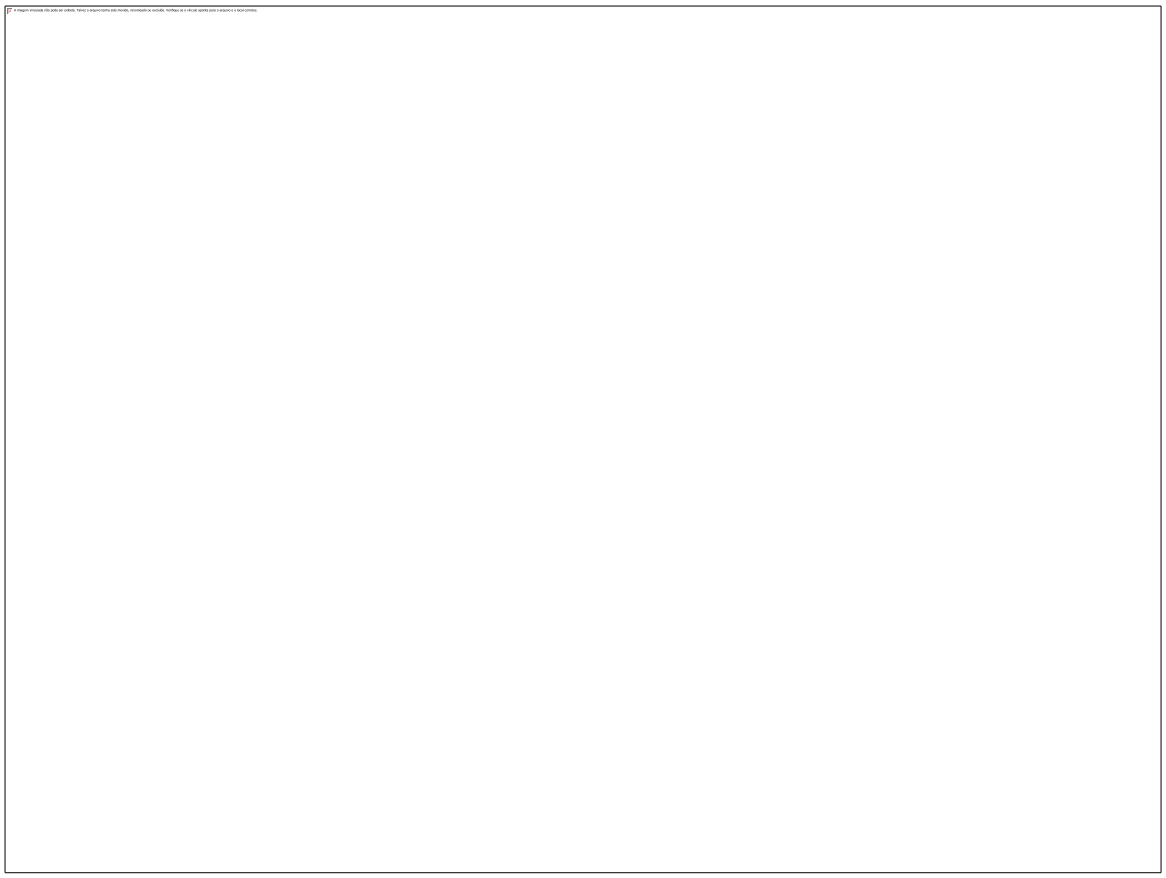
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO (UFMA). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (PPGAERO) — Rede Nordeste Aeroespacial. Disponível em: https://www.ppgaero.ufma.br/. Acesso em: 29 ago. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Brasil tem o segundo menor investimento do G20 no setor espacial, alerta CNI. Agência de Notícias da Indústria, 29 maio 2025. Disponível em: https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/brasil-tem-o-segundo-menor-investimento-do-g20-no-setor-espacial-alerta-cni/. Acesso em: 31 ago. 2026.

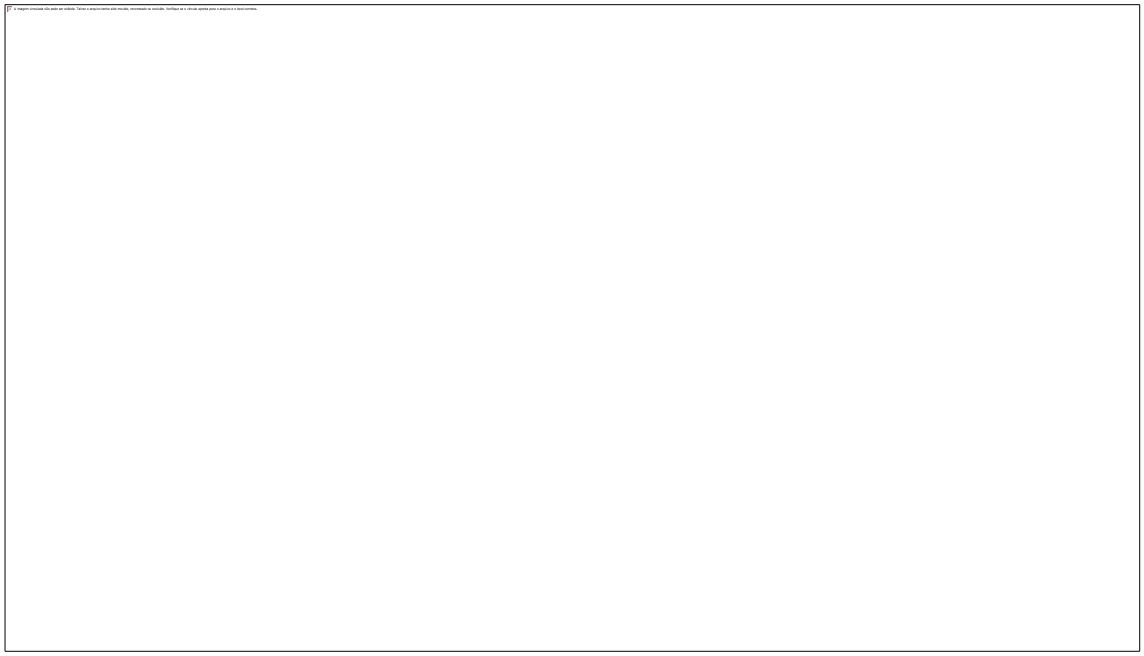
Anexos



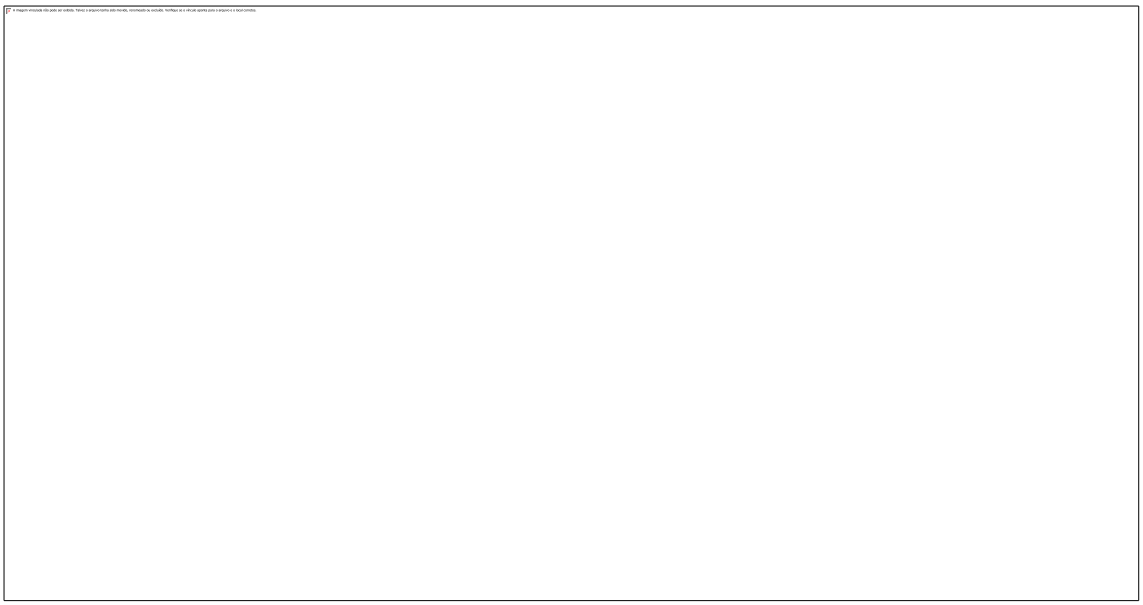
Encontro com o OVNE



Encontro com o OVNE



Imagens do Instagram



imagens do site



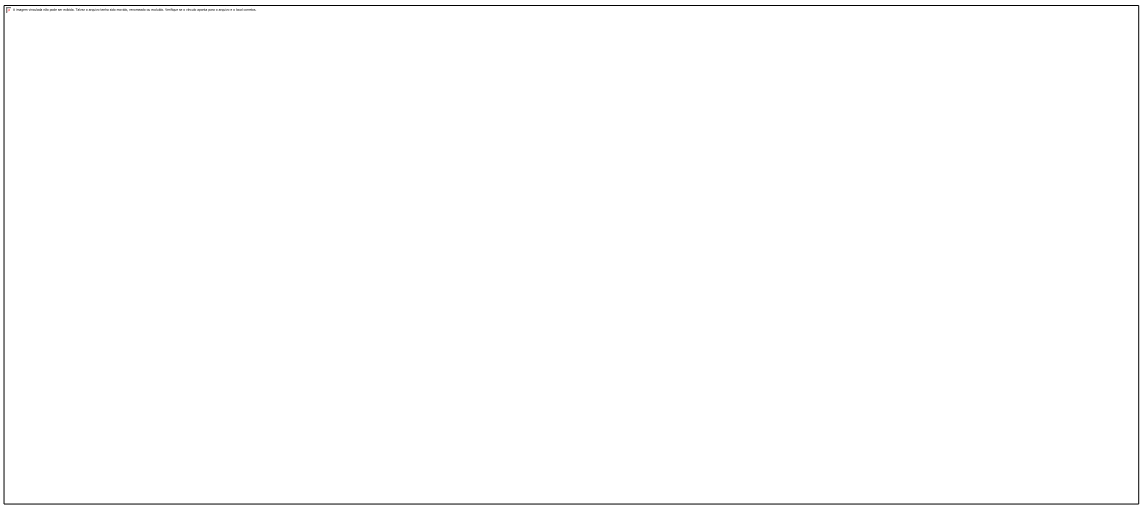
imagens do site



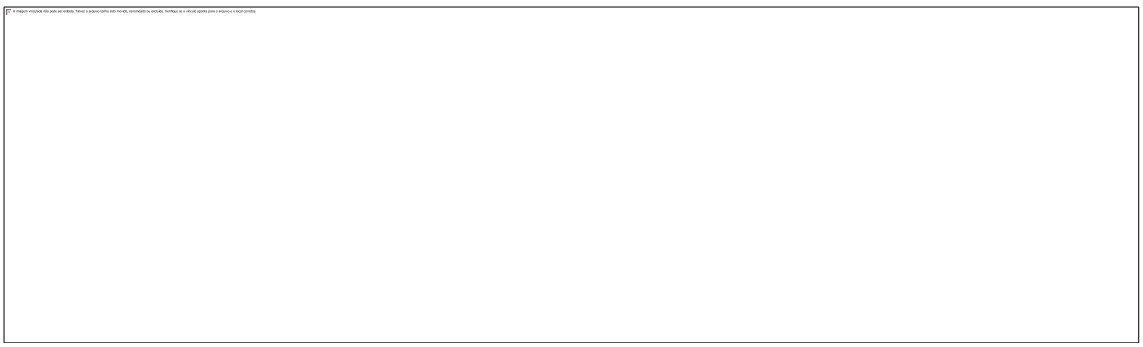
imagens do site



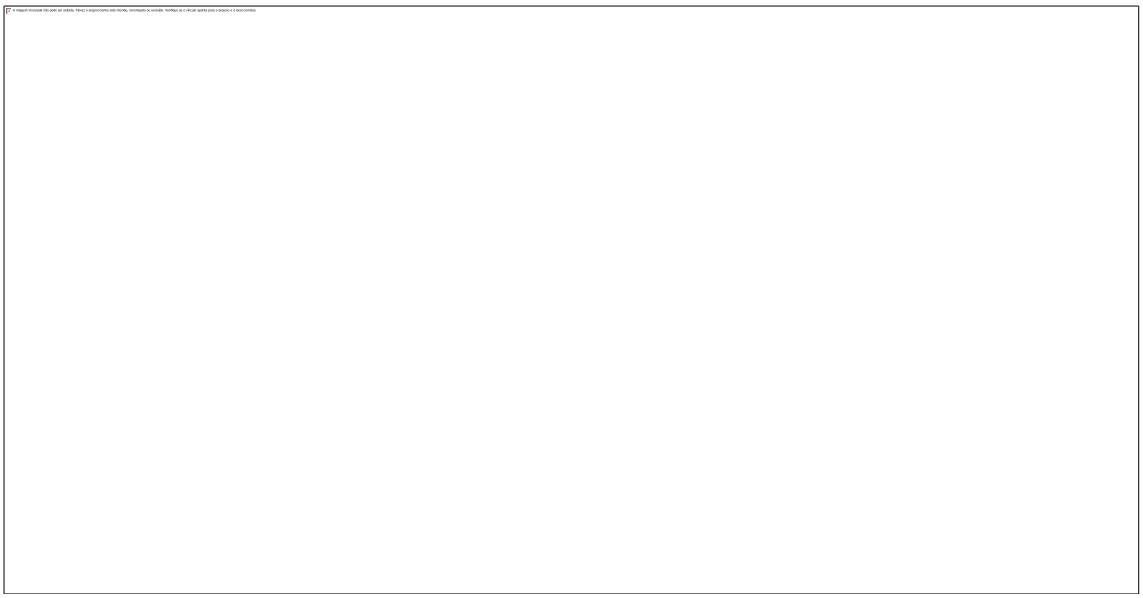
imagens do site



imagens do site



imagens do site



imagens do site

CÓDIGO: ET1686

AUTOR: IWRI SIMPLÍCIO FELIPE

ORIENTADOR: ELTON JOSE FIGUEIREDO DE CARVALHO

TÍTULO: Parametrização de campos de força coarse-grained de materiais bidimensionais para cálculo de campos de deformação

Resumo

Neste trabalho desenvolvemos e implantamos um protocolo para o cálculo das constantes elásticas de materiais bidimensionais como o grafeno, para deformações de tração uniaxial e cisalhamento. Esse procedimento permite utilizar essas grandezas como partes da função objetivo no ajuste de campo de forças coarse-grained para simular materiais bidimensionais em geral.

Palavras-chave: Grafeno. Otimização. Propriedades mecânicas. Dinâmica Molecular.

TITLE: Force field parameterization algorithm for two-dimensional nanomaterials

Abstract

In this work, we developed and implemented a protocol for calculating the elastic constants of two-dimensional materials, such as graphene, under uniaxial tensile and shear deformations. This procedure allows these quantities to be used as part of the objective function when fitting coarse-grained force fields to simulate two-dimensional materials in general.

Keywords: Graphene. Optimization. Mechanical properties. Molecular dynamics.

Introdução

O grafeno, por sua estrutura atômica bidimensional e simétrica, apresenta propriedades eletrônicas excepcionais. Por sua rede hexagonal, serve de ponto de partida para o estudo de materiais bidimensionais (2D) mais complexos, como os Dicalcogenetos de Metais de Transição (TMDs) (Manesco e Pulkin, 2022). Embora idealmente planares, essas estruturas estão sujeitas a distorções mecânicas não-uniformes na realidade, as quais afetam diretamente a sua estrutura eletrônica (Zhai e Sandler, 2019). Para estudar a deformação na escala de amostras experimentais, que chegam a centenas de nanômetros, a Dinâmica Molecular Coarse-Grained (CG) torna-se uma ferramenta indispensável (Cranford e Buehler, 2011;Ruiz et al 2015; Williams e Lísal, 2020).

Modelos Coarse-Grained simplificam a computação agrupando átomos. No entanto, as abordagens tradicionais frequentemente adotam redes quadradas (Cranford e Buehler, 2011) que destroem a simetria hexagonal do grafeno, dificultando análises eletrônicas subsequentes. Mapeamentos que preservam a simetria original, como os detalhados por Ruiz et al. (2015) e Williams e Lísal (2020), resolvem o problema geométrico do grafeno. Contudo, estender essa abordagem para outros materiais bidimensionais hexagonais impõe um novo desafio computacional: como calibrar os campos de força para que a malha reproduza com fidelidade as propriedades mecânicas de tração e cisalhamento do material original.

Devido à amplitude do espaço de parâmetros, que torna a busca manual por calibrações um processo altamente ineficiente, este trabalho propõe a automação computacional da parametrização de campos de força baseada na topologia da malha. Focando nas etapas de modelagem desenvolvidas, os objetivos específicos são:

Desenvolver um pipeline automatizado de avaliação mecânica capaz de extrair constantes elásticas lineares (E2) e não-lineares (E3) de geometrias bidimensionais sob testes de tração e cisalhamento.

Implementar a Otimização por Enxame de Partículas (PSO), técnica de otimização meta-heurística baseada na simulação de comportamentos sociais (Shi e Eberhart, 1998; Marini e Walczak, 2015; Ab Wahab et al., 2015), para parametrizar o modelo, minimizando o erro quadrático relativo entre a simulação e os valores de referência da literatura.

Estabelecer um protocolo computacional generalizável, estruturando a topologia e a função de custo matemática de forma que o método possa ser estendido futuramente para TMDs e outras simetrias análogas.

Metodologia

Orquestramos todo o fluxo de simulação e análise através de um pipeline computacional desenvolvido na linguagem Python. A arquitetura de dados e execução desta interface de linha de comando (CLI) encontra-se detalhada na figura 1. O algoritmo é responsável por gerar dinamicamente a topologia da malha, mapeando as coordenadas dos átomos e definindo as interações de ligações, ângulos e diedros. Para garantir a eficiência computacional e evitar redundâncias na topologia, o código implementa uma varredura

analítica sobre o eixo central das ligações, assegurando a restrição matemática de índices i<j durante a geração das torções diédricas. Além da modelagem topológica, o script em Python atua como interface para a execução automatizada do simulador molecular LAMMPS (Thompson et al., 2022) e para o pós-processamento dos dados de saída.

Realizamos a avaliação do comportamento mecânico do modelo no simulador LAMMPS através de ensaios virtuais de tração uniaxial e cisalhamento. A estruturação do campo de forças clássico baseia-se no modelo proposto por Ruiz et al. (2015). Para descrever as interações da malha, adotou-se um potencial de Lennard-Jones para as interações não-ligadas e potenciais harmônicos para os ângulos e diedros. Diferentemente do trabalho de referência, que emprega um potencial do tipo Morse para o estiramento das ligações, neste estudo optamos pela utilização de um potencial harmônico também para as ligações.

Definimos a métrica de desempenho do modelo por uma função de custo (Fitness), que quantifica a discrepância entre o comportamento mecânico da malha simulada e os valores de referência da literatura. Os dados brutos de tensão e deformação extraídos do LAMMPS são processados em Python como pode ser observados nas figuras 2 e 3, onde as curvas até o ponto de ruptura são ajustadas pelo polinômio y=E3x2+E2x. Deste ajuste, extraem-se a constante elástica linear (E2) e a constante elástica não-linear de terceira ordem (E3).

A simulação de tensão e deformação consiste no cálculo da tensão na malha à medida que se aplica uma deformação gradual. A tensão do sistema foi calculada considerando todos os átomos da simulação, a partir das contribuições cinética e virial, relativa às forças interatômicas, na forma da Figura 5.

No caso da tração uniaxial, deformamos a dimensão x da folha a uma taxa de deformação e_rate constante, de forma que o comprimento é dado por L(t) = L0 (1 + e_rate * t). Já para a simulação de cisalhamento, deformamos as coordenadas x da caixa de acordo com a expressão x(t) = x0 * y * (1 + e_rate * t), de forma que uma folha retangular de grafeno é forçada a adotar uma geometria de losango. Em ambos os casos, consideramos a deformação máxima de 25%, que é suficiente para alcançar a ruptura da folha no campo de força AIREBO (Stuart; Tutein; Harrison, 2000).

Calculamos então o erro quadrático relativo normalizado agregando os desvios de tração e cisalhamento observados na figura 6.

Nesta formulação, o algoritmo PSO busca os parâmetros que minimizem o valor de Fit, indicando que a malha convergiu para as propriedades elásticas almejadas. A dinâmica do laço de repetição do otimizador heurístico, onde a CLI atua como avaliadora da função de custo em cada iteração, está esquematizada na Figura 7. Estruturamos o vetor de busca do algoritmo PSO é composto pelas variáveis a serem otimizadas dinamicamente: a distância de equilíbrio da ligação (r0), a constante elástica da ligação (K_b) e a constante angular (K_theta). Os parâmetros associados à flexão fora do plano (K_phi) e à interação de van der Waals (epsilon_LJ) são mantidos fixos, adotando-se as especificações padronizadas do modelo basal.

Resultados e Discussões

A primeira etapa consistiu na implementação das simulações de tração e cisalhamento, juntamente com as rotinas de ajuste de funções quadráticas às curvas de tensão/deformação, a fim de reproduzir as curvas em Cranford e Buehler, 2011; Ruiz et al 2015 (Min; Aluru, 2011).

Neste processo, produzimos uma biblioteca em Python que gera as geometrias, despacha os processos LAMMPS e efetua os ajustes utilizando a biblioteca scipy. Apresentamos esses resultados nas Tabelas 1 e 2, assim como gráficos das Figuras 2 e 3.

Observamos um desvio da ordem de 20% entre os resultados das constantes elásticas de segunda e terceira ordem E2 e E3 na tração uniaxial obtidas neste trabalho e as das referências. Nesse contexto, Ruiz (2015) menciona que, experimentalmente, são medidas difíceis de se realizar e há grande dispersão nos valores relatados na literatura e, por isso, considera um objetivo razoável para o ajuste E2 = 1TPa. Além disso, Ruiz (2015) e Cranford(2011) parametrizam campos de força coarse-grained (este último em simetria quadrada), ao passo que Min (2011) efetuou cálculos de cisalhamento a diversas temperaturas aplicando o campo de forças AIREBO. A dispersão dos valores nesses trabalhos, entretanto, não destoa da dispersão dos resultados experimentais.

Um fator relevante nas simulações de cisalhamento é o deslocamento dos átomos para fora do plano, na forma de ondas alinhadas com a direção da deformação (Figura 4). Isso faz com que o comportamento da curva de tensão/deformação seja distinto em duas regiões: em pequenos deslocamentos, o cisalhamento é planar e está associado a uma constante elástica maior. A partir de um deslocamento da ordem de 5%, a estrutura passa a se enrugar, tornando-se mais flexível, associado a uma constante elástica menor. Esta característica faz com que os métodos analíticos mais simples tenham que ser complementados para lidar com materiais como o grafeno: seja considerando um ajuste quadrático às curvas de tensão/deformação, seja considerando ajustes independentes para cada região. Neste trabalho optamos pelo ajuste quadrático, que as referências consideradas não abordam. Um caminho viável para análise futura, inclusive no contexto de função objetivo no ajuste de campo de força, consiste em avaliar as características desse deslocamento ondular, como comprimento de onda e amplitude em função da deformação aplicada, como exploram Min e Aluru (2011).

O passo seguinte consistiu em implementar a inclusão do protocolo de cálculo das constantes elásticas de tração e cisalhamento no pacote fffit (CARVALHO, 2021). Considerando um tamanho inicial de folhas de grafeno com cerca de 4000 átomos e a necessidade de realizar as simulações de tração e cisalhamento para populações de dezenas de partículas no contexto do PSO, optamos por desenvolver uma orquestração através do protocolo MPI. Com isso é possível que o orquestrador despache processos paralelos do software LAMMPS, enquanto permite vincular mais de uma CPU a cada processo. Esta etapa se encontra em andamento e será o ponto de partida para os próximos ciclos deste projeto de pesquisa.

Conclusão

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, desenvolvemos uma suíte de programas em Python que orquestra processos do simulador de dinâmica molecular LAMMPS para calcular as curvas de tensão/deformação, em tração uniaxial e cisalhamento, e efetuar ajuste quadrático a essas curvas, obtendo assim constantes elásticas de segunda e terceira ordem.

Esta suíte pode ser incluída como parte de uma função objetivo na parametrização de campos de força de grafeno e de outros materiais bidimensionais como dicalcogenetos de metais de transição.

Realizamos uma validação inicial do algoritmo na reprodução de constantes elásticas de estruturas atomísticas de grafeno.

Iniciamos a implementação da suíte de cálculo de constantes elásticas ao software fffit, que busca parametrizar campos de força utilizando algoritmos de otimização como o PSO (Particle Swarm Optimiztion). A fim de maximizar o rendimento desse cálculo, buscamos implementar a orquestração dos motores de cálculo através da biblioteca MPI (Message Parsing Interface). Este código está completo e em fase de testes de validação.

As próximas etapas deste projeto consistem em aplicar a parametrização com PSO a estruturas coarse-grained de grafeno, com mapeamentos 1-para-4 como em Ruiz (2015) e Williams (2020) e também mapeamentos 1-para-16 e até 1-para-64. Validado este método para o grafeno, passaremos a desenvolver um campo de força granulado para o Dissulfeto de Molibdênio.

Referências

AB WAHAB, M. N.; NEFTI-MEZIANI, S.; ATYABI, A. A Comprehensive Review of Swarm Optimization Algorithms. PLoS ONE, v. 10, n. 5, p. e0122827, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0122827.

CARVALHO, EJF; SOUZA, J. H. A. FFFIT: Ajuste heurístico de parâmetros de campo de força para dinâmica Molecular. Local: UFRN, Natal - RN, 2021. Registro BR512021000174-5

CRANFORD, S.; BUEHLER, M. J. Twisted and coiled ultralong multilayer graphene ribbons. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, v. 19, n. 5, p. 054003, 2011. DOI: 10.1088/0965-0393/19/5/054003.

JORGENSEN, W. L.; SEVERANCE, D. L. Aromatic-aromatic interactions: free energy profiles for the benzene dimer in water, chloroform, and liquid benzene. Journal of the American Chemical Society, American Chemical Society, 1990. DOI: 10.1021/ja00168a022.

LAMMPS. compute pressure command. 2026. Disponível em:https://docs.lammps.org/compute_pressure.html. Acesso em: 31 ago. 2026.

MARINI, F.; WALCZAK, B. Particle swarm optimization (PSO). A tutorial. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, v. 149, p. 153-165, 2015. DOI: 10.1016/j.chemolab.2015.08.020.

MIN, K.; ALURU, N. R. Mechanical properties of graphene under shear deformation. Applied Physics Letters, American Institute of Physics, 2011. DOI: 10.1063/1.3534787.

RUIZ, L.; XIA, W.; MENG, Z.; KETEN, S. A coarse-grained model for the mechanical behavior of multi-layer graphene. Carbon, v. 82, p. 103-115, 2015. DOI: 10.1016/j.carbon.2014.10.040.

SHI, Y.; EBERHART, R. C. Parameter selection in particle swarm optimization. In: ANNUAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY PROGRAMMING, 7., 1998, San Diego. Anais [...]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. p. 591-600.

STUART, S. J.; TUTEIN, A. B.; HARRISON, J. A. A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions. The Journal of Chemical Physics, AIP Publishing, 2000. DOI: 10.1063/1.481208.

THOMPSON, A. P. et al. LAMMPS - a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales. Computer Physics Communications, v. 271, p. 108171, 2022. DOI: 10.1016/j.cpc.2021.108171.

WILLIAMS, C. D.; LÍSAL, M. Coarse grained models of graphene and graphene oxide for use in aqueous solution. 2D Materials, v. 7, p. 025025, 2020. DOI: 10.1088/2053-1583/ab6f0c.

ZHAI, D.; SANDLER, N. Electron dynamics in strained graphene. Modern Physics Letters B, World Scientific Publishing Company, 2019. arXiv:1910.05619v1.

Anexos

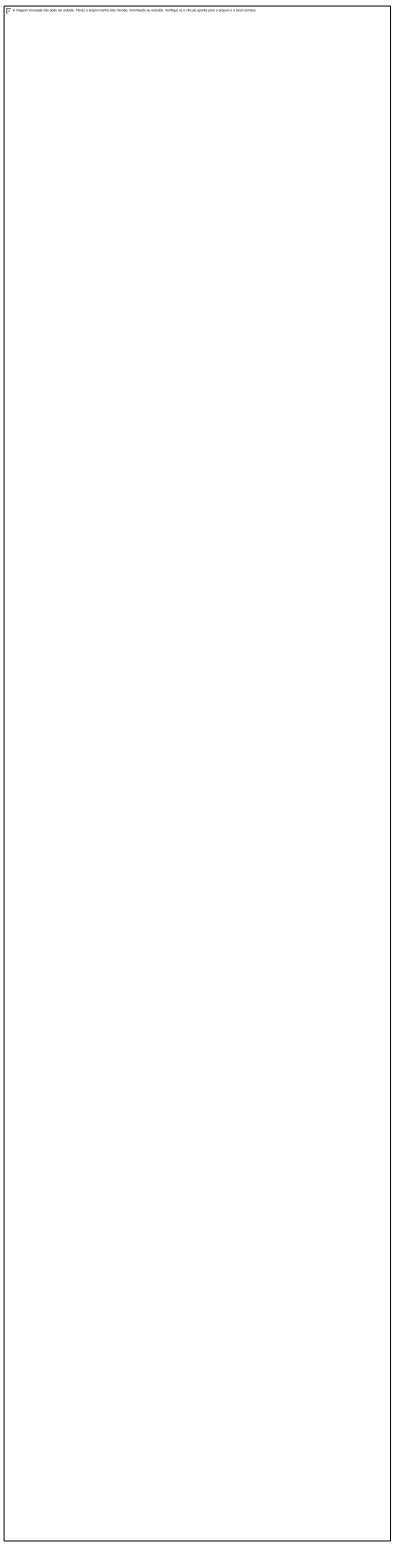


Figura 1 - Fluxograma da arquitetura de dados e execução da Interface de Linha de Comando (CLI) para modelagem e avaliação mecânica.



Figura 2 - Gráfico da curva de cisalhamento

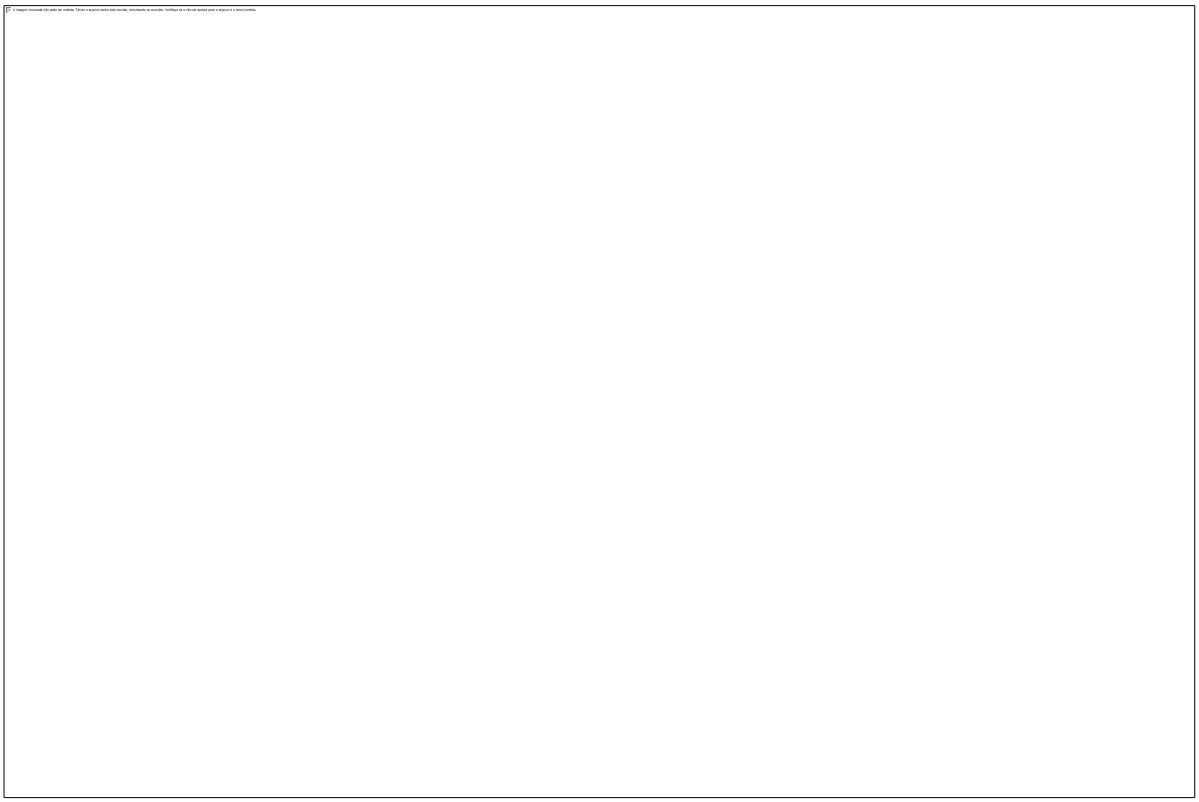


Figura 3 - Gráfico da curva de tração



Figura 4 - Ilustração da ondulação da folha de grafeno devido ao cisalhamento (Azul são pontos de deslocamento para cima do plano e vermelho pontos de deslocamento para baixo do plano).

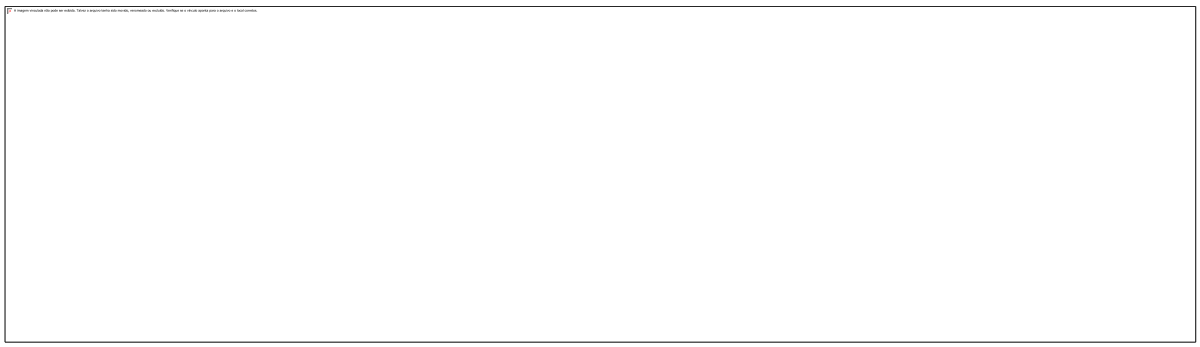


Figura 5 - Fórmula do cálculo da pressão



Figura 6 - Fórmula do erro quadrático relativo normalizado

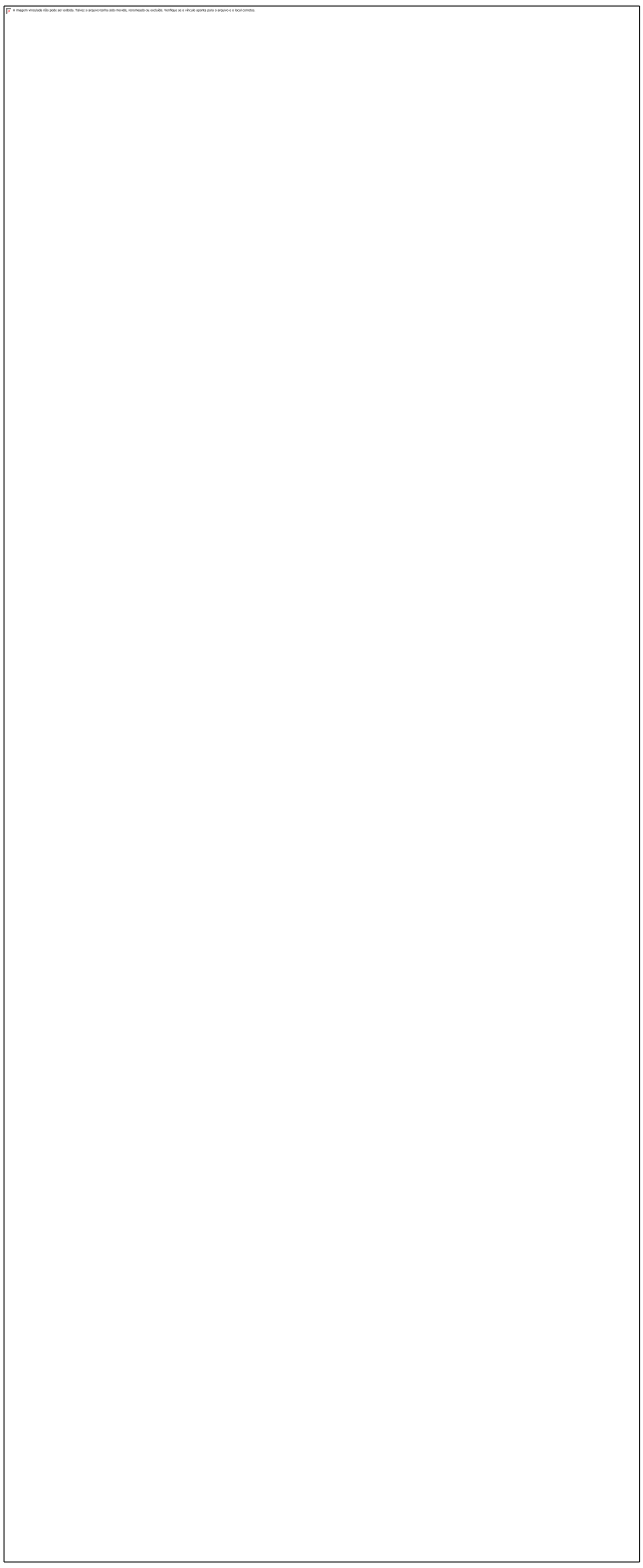


Figura 7 - Fluxograma do laço de repetição do algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO) integrado à CLI.

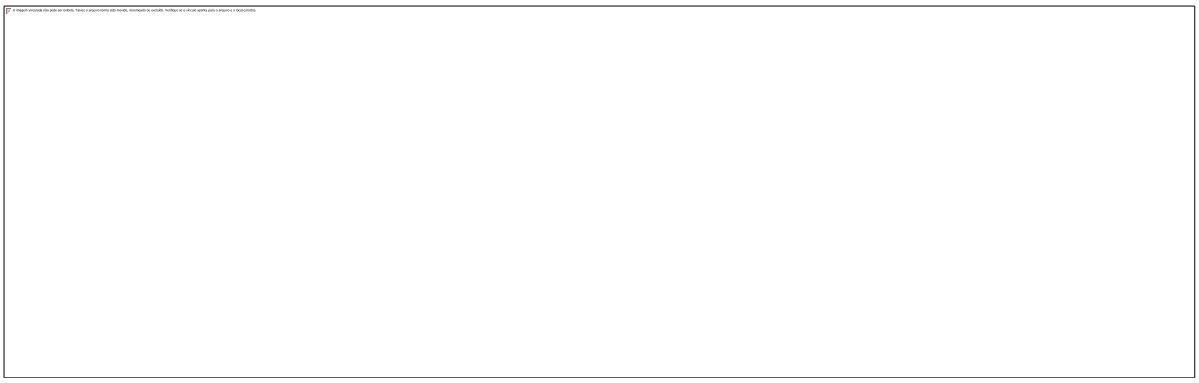


Tabela 1: Comparação dos resultados obtidos para o cisalhamento com a literatura

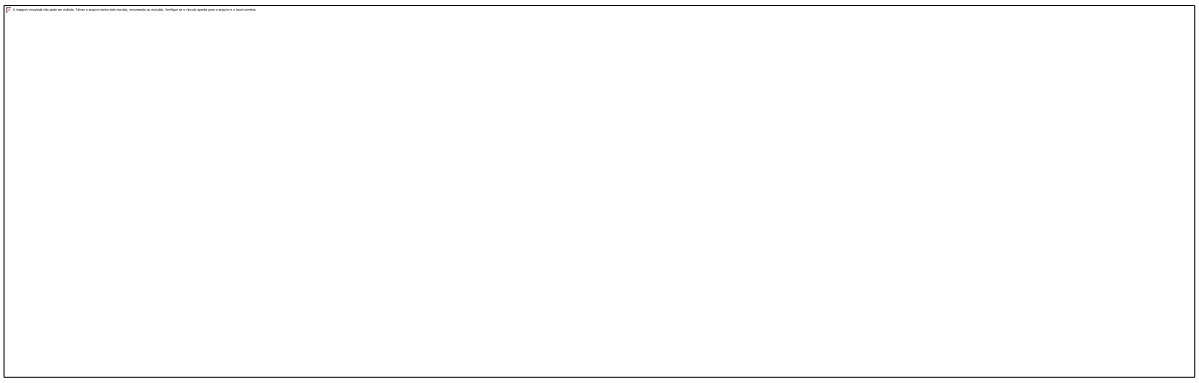


Tabela 2: Comparação dos resultados obtidos para o tração com a literatura

CÓDIGO: HS0679

AUTOR: BRENDO LUCIANO GOMES

ORIENTADOR: ADA LIMA FERREIRA DE SOUSA

TÍTULO: Letramentos acadêmicos, linguagem e metacognição: propostas de atividades de leitura e escrita nos cursos de Letras, de Ciências Humanas e de Ciências da Saúde

Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar uma proposta didática para o ensino do gênero discursivo relato pessoal, aplicada a discentes ingressantes do curso de Licenciatura em Letras – Língua Portuguesa e Literaturas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), buscando identificar elementos que contribuam para o aprimoramento do ensino-aprendizagem da leitura e da escrita no ensino superior. Metodologicamente, caracteriza-se como uma pesquisa-ação, de natureza aplicada, de abordagem qualitativa e de cunho descritivo, fundamentada nos estudos sobre Letramento Acadêmico e Metacognição. A atividade analisada compreendeu a leitura de uma reportagem da BBC News Brasil sobre a crise climática e a posterior produção de um relato pessoal autoral, contemplando etapas de revisão e reescrita. Nesse contexto, buscou-se analisar as contribuições de uma proposta que reconhece o estudante como sujeito criativo, valorizando suas vivências, memórias e conhecimentos prévios no processo de produção textual. Ademais, examinou-se a reescrita como processo de regulação metacognitiva, por meio do qual os estudantes puderam monitorar e aprimorar a própria escrita, especialmente quanto à coesão, à coerência e à construção dos sentidos. Os resultados evidenciam que o trabalho sistemático com produção, revisão e reescrita textual favorece o desenvolvimento da autonomia linguística e de habilidades metacognitivas, contribuindo para a formação acadêmica e docente inicial dos licenciandos.

Palavras-chave: Letramento acadêmico; Metacognição; Relato pessoal

TITLE: Academic Literacy, Language, and Metacognition: Reading and Writing Curricula in Higher Education

Abstract

The purpose of this study is to analyze a teaching proposal for the personal narrative genre, applied to first-year students in the Bachelor's Degree program in Language and Literature—Portuguese Language and Literature at the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN), with the aim of identifying elements that contribute to

improving the teaching and learning of reading and writing in higher education. Methodologically, this study is characterized as applied action research with a qualitative and descriptive approach, grounded in studies on Academic Literacy and Metacognition. The activity analyzed involved reading a BBC News Brasil report on the climate crisis and subsequently producing a personal narrative, including stages of revision and rewriting. In this context, the study sought to analyze the contributions of an approach that recognizes students as creative agents, valuing their experiences, memories, and prior knowledge in the process of text production. Furthermore, rewriting was examined as a process of metacognitive regulation, through which students were able to monitor and improve their own writing, particularly in terms of cohesion, coherence, and the construction of meaning. The results show that systematic work on text production, revision, and rewriting promotes the development of linguistic autonomy and metacognitive skills, contributing to the academic and initial teacher training of pre-service teachers.

Keywords: Academic literacy; Metacognition; Personal narrative

Introdução

Não há dúvidas de que as práticas de leitura e escrita na universidade são fundamentais para o desenvolvimento acadêmico dos estudantes ao longo de sua formação. No contexto da Licenciatura em Letras, essas experiências assumem um papel ainda mais central, tendo-se em vista que a linguagem constitui o principal objeto de estudo e de atuação profissional desses futuros docentes. Nesse sentido, no âmbito da formação universitária, intensifica-se a necessidade de compreender como o estudante pode superar possíveis adversidades e aprimorar suas competências linguísticas para atender às exigências da graduação. Além disso, busca-se que o futuro docente desenvolva uma aprendizagem crítica e reflexiva, capaz de contribuir para uma prática pedagógica mais consciente, significativa e eficiente. Dessa maneira, espera-se que que o aprimoramento das práticas de leitura e escrita dos licenciandos esteja associado ao desenvolvimento do letramento crítico, promovendo consciência sobre os usos da linguagem e os processos de produção textual. Essa perspectiva favorece uma postura mais autônoma e reflexiva nas etapas de planejamento, revisão, correção e reescrita. Nessa direção, Gerhardt (2017) enfatiza a importância de desenvolver práticas de linguagem fundamentadas na reflexão consciente sobre todas as etapas da produção textual, como planejamento, escrita e revisão. Além disso, a autora destaca a relevância do aprimoramento das práticas cognitivas e metacognitivas relacionadas à linguagem, possibilitando que os estudantes compreendam de forma mais crítica e reflexiva a organização e o funcionamento dos sistemas linguísticos. Ademais, é importante destacar que o aprimoramento das práticas de linguagem dos estudantes ingressantes na universidade ultrapassa a simples correção de aspectos gramaticais. Exige-se, também, o domínio das formalidades próprias da escrita acadêmica, bem como a construção de raciocínios críticos que transcendam o senso comum e se articulem ao conhecimento científico. Nesse processo, torna-se fundamental o desenvolvimento da cognição relacional, entendida por Neves (2017) como a capacidade de construir compreensões e conceituações a partir da relação entre os conhecimentos prévios do sujeito, os fenômenos do mundo e os conteúdos lidos e estudados. Nesse contexto, este trabalho analisou criticamente uma atividade de produção do gênero relato pessoal, aplicada a ingressantes da Licenciatura em Letras – Língua Portuguesa e Literaturas da UFRN, na

disciplina de Leitura e Produção de Texto, buscando identificar contribuições para o aprimoramento do ensino-aprendizagem da leitura e da escrita. A pesquisa também aprofundou o referencial teórico-metodológico dos Estudos em Metacognição e Letramento, suscitando reflexões sobre a formação acadêmica e docente dos licenciandos Cabe destacar que a escolha da turma e da disciplina deveu-se à atuação da professora coordenadora do projeto ao qual se vincula o plano de trabalho. A análise do gênero justifica-se por seu potencial pedagógico no ensino de leitura e escrita, ao possibilitar a mobilização de vivências, memórias e experiências individuais, articulando conhecimentos pessoais e acadêmicos em práticas significativas de produção textual. A partir disso, analisou-se a proposta didática e as produções textuais dos estudantes, considerando a primeira versão e a reescrita. A investigação observou aspectos do referencial teórico, visando contribuir para o letramento linguístico acadêmico dos licenciandos, especialmente nas dimensões metacognitiva e metalinguística da leitura e escrita. Além desta introdução, o relatório está organizado em quatro seções: Metodologia, que apresenta os procedimentos adotados na pesquisa; Resultados e discussões, dedicada ao referencial teórico e à análise da proposta didática; Conclusões, que discutem a relevância e as contribuições do plano de trabalho; e Referências, com as obras utilizadas no estudo.

Metodologia

Esta pesquisa foi aprovada pelo Comitê de Ética e Pesquisa (CEP) sob o número de parecer 7.512.256 junto ao Certificado de Apresentação de Apreciação Ética (CAAE) nº 85711724.0.0000.5537. Tem caráter aplicado, pois, mais do que gerar novos conhecimentos, tem por meta resolver problemas (Paiva, 2019), a saber, dificuldades de ingressantes em Letras com práticas de leitura e escrita, por meio do desenvolvimento e implementação de uma sequência didática, para o trabalho com o gênero discursivo relato pessoal, pautada nos estudos em Metacognição, de modo a atingir os objetivos já apresentados. O presente estudo também caracteriza-se como uma pesquisa-ação, delineamento que, segundo Brasileiro (2021), demanda a intervenção direta do pesquisador em uma realidade social específica com o objetivo de solucionar um problema de ordem coletiva. Nesta abordagem, os investigadores e os sujeitos da pesquisa participam de forma cooperativa e participativa. Nesse sentido, esta pesquisa-ação buscou contribuir para o aprimoramento das práticas e dos contextos investigados, a partir da participação dos próprios sujeitos envolvidos (Kemmis, McTaggart e Nixon, 2014; Paiva, 2019). Além disso, esse trabalho é de abordagem qualitativa e de cunho descritivo, uma vez que o objetivo geral é analisar, no âmbito dos estudos em Metacognição e da Linguística aplicada, a proposta de atividade do gênero Relato pessoal, aplicada a uma turma do curso de Licenciatura em Letras – Língua Portuguesa e Literaturas da UFRN, na disciplina de Leitura e Produção de Texto. Objetiva-se, em pesquisas aplicadas e qualitativas, a geração de conhecimentos novos e universais, por meio do aprofundamento e da compreensão de aspectos não quantificáveis da realidade. 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 atividade objeto desta análise é constituída por duas partes: a primeira apresenta um texto-base, correspondente a uma reportagem publicada em 25/10/2021 no portal de notícias BBC News Brasil, intitulada “O temor de jovens sobre ‘futuro assustador’ com crise climática”; a segunda consiste na proposta de produção textual propriamente dita, na qual se solicita que o aluno dê

continuidade à reportagem, produzindo seu próprio relato. Além disso, no comando da atividade é informado que a produção passará posteriormente por um processo de reescrita e aprimoramento textual. No que diz respeito aos procedimentos metodológicos, inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico (Gil, 2017), em livros e artigos científicos, de conceitos pertinentes, ao longo do qual voltamos a nossa atenção ao conceito de letramento acadêmico (Botelho; Neves, 2019; Fisher; 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 e discutimos a proposta da atividade em questão, buscando estabelecer relações com os conceitos estudados; em outro momento foi feita a leitura das versões iniciais e reescritas dos relatos produzidos pelos alunos; por fim, dedicamo-nos à elaboração dos produtos de pesquisa (relatório do e-CICT, resumos para submissão a eventos, apresentações orais, artigos científicos).

Resultados e Discussões

Conforme o referencial teórico-metodológico que fundamenta esta pesquisa, a metacognição é uma habilidade dos seres humanos de monitorar e regular seus próprios processos cognitivos. Dessa maneira, entende-se que "[...] pensar sobre o próprio pensar, é um conceito que envolve uma ação cognitiva que se volta à reflexão sobre outras ações cognitivas" (Botelho; Almeida; Neves, 2024, p. 39). Conforme Botelho e Neves (2019), o conhecimento que o indivíduo possui acerca de seus próprios processos cognitivos favorece a autorregulação das atividades desempenhadas, bem como promove um desenvolvimento significativo em sintonia com as demandas e exigências do contexto em que se encontra inserido. Nesse contexto, no âmbito acadêmico, o docente pode recorrer a estratégias metacognitivas para elaborar metodologias que valorizem os conhecimentos prévios dos estudantes, articulando-os como elementos propulsores do processo de aprendizagem. Desse modo, os professores passam a favorecer o desenvolvimento de uma postura mais ativa e autônoma por parte dos discentes, estimulando-os a planejar, monitorar, avaliar e refletir criticamente sobre suas práticas de escrita e reescrita, por exemplo. No que se refere à concepção de letramento utilizada nesta pesquisa, entendemos que se fundamenta em uma perspectiva social e plural da aprendizagem da língua materna, que ultrapassa o ensino formal da escrita promovido pelas instituições escolares (Kleiman, 1995). Nesse sentido, as práticas de leitura e escrita deixam de se limitar ao domínio do sistema linguístico no contexto escolar e passam a constituir formas de inserção social, articuladas aos saberes, experiências e práticas vivenciadas pelos sujeitos em diferentes contextos. Sob essa perspectiva, Koerner e Fischer (2024) corroboram que o ensino da leitura e da escrita na universidade deve ser entendido como um processo socialmente situado, que considera as trajetórias e os conhecimentos prévios dos discentes acerca dessas práticas, favorecendo o desenvolvimento efetivo dessas competências no contexto acadêmico. Assim, observa-se a importância de instrumentos e metodologias capazes de aprimorar o letramento acadêmico dos alunos e desenvolver uma formação crítica a partir do refinamento dessas competências linguísticas. Por essa razão, este trabalho teve como objetivo analisar, no âmbito dos estudos em Metacognição e da Linguística aplicada, a proposta de atividade com o gênero discursivo relato pessoal", aplicada a uma turma do curso de Licenciatura em Letras – Língua Portuguesa e Literaturas da UFRN, bem como das produções textuais dos estudantes, considerando tanto a primeira versão quanto a reescrita dos textos. A proposta didática analisada tem duas etapas: a atividade de leitura

de uma reportagem da BBC News Brasil intitulada “O temor de jovens sobre ‘futuro assustador’ com crise climática” e, depois, a proposta de produção textual do gênero relato pessoal. Na primeira etapa, o texto introduz uma pesquisa global realizada com 10 mil jovens de dez países, abordando suas preocupações em relação às mudanças climáticas e aos impactos ambientais no futuro. Em seguida, a reportagem apresenta três depoimentos reunidos sob o título “Um medo real sobre o futuro”, nos quais jovens relatam experiências e percepções pessoais acerca da crise climática em seus contextos locais. A segunda etapa da proposta corresponde à produção textual propriamente dita. Nela, o estudante é convidado a imaginar que dará continuidade à reportagem da BBC, elaborando seu próprio relato pessoal sobre a crise climática. O enunciado solicita que o aluno reflita sobre o tipo de relato e o estilo mais adequado e, a partir da leitura da reportagem, desenvolva um texto autoral para ser entregue. A partir da atividade de leitura, observa-se que os dados e os relatos pessoais apresentados aproximam o leitor da temática ao evidenciarem sentimentos, medos e consequências concretas das transformações ambientais vivenciadas no cotidiano dos entrevistados. Dessa forma, a leitura promove uma reflexão crítica acerca da crise climática, ao mesmo tempo em que estimula a expressão de experiências, opiniões e sentimentos relacionados às questões ambientais e sociais abordadas, os quais serão posteriormente trabalhados na produção do relato pessoal autoral. Assim, o estudante não apenas compreende informações sobre o tema, mas também passa a se reconhecer como parte do processo, refletindo sobre seus próprios conhecimentos, sentimentos, opiniões e vivências relacionadas às questões ambientais, mobilizando e empregando, de maneira crítica e engajada, seus saberes prévios na construção de novos sentidos e aprendizagens. No que diz respeito à produção do relato propriamente dita, é pertinente destacar a diferenciação estabelecida por Sinha (1999) entre o sujeito produtor (apprenticeship) e o sujeito criador (creative self-expression). Na primeira perspectiva, o aluno é posicionado como um emulador e produtor, cujo objetivo consiste na formação de um sujeito capaz de reproduzir técnicas, modelos e padrões culturalmente estabelecidos ou vinculados à lógica produtiva e econômica. Já na segunda perspectiva, o aluno é compreendido como emulador e criador, de modo que o foco deixa de estar centrado na reprodução fiel para privilegiar a expressão individual. Nesse caso, o “fazer” ultrapassa a dimensão técnica e passa a constituir parte do processo de construção da subjetividade, da autoria e da identidade criativa do estudante. Assim, a proposta de produção do relato pessoal não se limita à mera “reprodução” de fatos oriundos do texto-base previamente lido, mas busca reconhecer e validar o aluno como um sujeito expressivo e criativo. Nessa perspectiva, o valor do texto não reside na simples precisão dos fatos, mas na capacidade do estudante de mobilizar sua individualidade expressiva naquilo que escreve, reinterpretando e reconstruindo sua própria realidade por meio da linguagem. Nesse sentido, a leitura dos relatos produzidos pelos alunos após a realização da atividade confirma esse movimento de valorização da autoria e da expressão subjetiva. Nos textos lidos, de forma majoritária, a reprodução das informações presentes na reportagem da BBC cedeu espaço à mobilização de memórias, sentimentos e experiências pessoais para a construção de narrativas profundamente marcadas pela individualidade e pelo envolvimento emocional. Entre os textos produzidos, destacaram-se histórias comoventes de alunos que convivem diretamente com a seca e com as dificuldades impostas pela escassez de água em regiões rurais, bem como relatos de estudantes que cresceram em contextos urbanos e industriais, como na China, trazendo percepções distintas sobre poluição, clima e qualidade de vida. A diversidade cultural e social presente nas produções evidenciou as diferentes formas de experienciar a crise climática e a capacidade dos alunos de reinterpretar o tema a partir de suas próprias trajetórias.

Ainda no que diz respeito à produção autoral do relato pessoal, é importante destacar a previsão de reescrita elencada na proposta, uma vez que a revisão e a devolutiva das produções foram consideradas parte do instrumento avaliativo. Nesse sentido, de acordo com o referencial teórico aqui utilizado, o processo de escrever configura-se como um fluxo não linear, caracterizado pelo diagnóstico de falhas, escolhas deliberadas, avaliações constantes e ciclos sucessivos de leitura e revisão. Esse dinamismo reflete a estreita relação entre a regulação cognitiva e a atividade metalinguística do autor que "são realizadas intencionalmente pela pessoa, ou, ao menos, deveriam ser. Algumas ações são mais implícitas (ou seja, recebem menos atenção do escritor) e outras, mais explícitas (são mais monitoradas e controladas)", a depender de fatores como nível de letramento do redator e o nível de complexidade da tarefa (Paltila, 2024, p. 19). No que tange à revisão textual, Paltila (2024) defende que a atividade de revisar o texto constitui um subprocesso de regulação metacognitiva da escrita, a qual se constitui em níveis diversos (palavra, frase, período, unidade textual). Por essa razão, entende que o ensino e os livros didáticos não podem reduzi-la a um mero reparo de normas gramaticais e estruturas de gênero. A revisão deve, então, ser abordada como uma ferramenta pedagógica capaz de desenvolver a autonomia do aluno, permitindo que ele aprenda a diagnosticar pontos críticos nos textos e a tomar decisões conscientes para solucioná-los. Já a reescrita trata-se de uma etapa da revisão textual, em que os autores partem do núcleo de um texto já existente (escrito ou mental) e o utilizam para: (1) dar forma a uma nova produção; (2) sanar erros e imperfeições; e/ou (3) reestruturar e parafrasear o texto ou partes dele. Ressalta-se que essas três ações não são excludentes. Durante o processo de aprimoramento, é perfeitamente comum que o redator faça correções normativas na sintaxe ao mesmo tempo em que refaz um parágrafo cujo sentido tenha ficado incompleto ou truncado (Abreu, 2017, apud Paltila, 2024). Diante disso, verificou-se, na análise das produções dos relatos dos estudantes que passaram por processos sistemáticos de correção e reescrita, a validade dessas premissas teóricas. Os textos foram avaliados a partir de critérios, devidamente explicitados, a saber: aspectos estruturais do gênero trabalhado, fatores gramaticais, coesão e coerência. Desse modo, a partir dos pontos sinalizados no processo de correção, os estudantes puderam refinar os mecanismos de coesão e referenciação textual, sanando os problemas de ambiguidade que por vezes travavam a leitura, resultando, assim, em uma evolução substancial no texto reescrito. Assim, evidenciou-se que o redator, quando mediado por objetivo avaliativo claro, desenvolve a habilidade de monitorar a própria escrita, corroborando a concepção de que a revisão enquanto subprocesso de regulação metacognitiva deixa de ser um mero ato punitivo e passa a funcionar como parte de um processo de autogerenciamento e autonomia linguística.

Conclusão

A partir do referencial teórico anteriormente esmiuçado, observou-se que o trabalho sistemático com leitura, produção, revisão e reescrita pode contribuir significativamente para o desenvolvimento do letramento acadêmico e das habilidades metacognitivas dos aprendizes. Além disso, a partir da atividade concernente ao gênero relato pessoal, evidenciou-se que propostas didáticas que valorizam os conhecimentos prévios, a autoria, a reflexão e o acompanhamento processual da escrita podem favorecer uma relação mais consciente e autônoma dos estudantes com a linguagem. Para a formação de futuros professores de Língua Portuguesa, essa dimensão assume particular relevância, considerando que as experiências vivenciadas durante a graduação podem

repercutir posteriormente em suas próprias concepções e práticas de ensino. Dessa forma, entende-se que a presente pesquisa atingiu seu objetivo central ao analisar a proposta didática do gênero discursivo relato pessoal e suas contribuições para o desenvolvimento das práticas de leitura e escrita, especialmente no que se refere às dimensões metacognitiva e metalinguística do processo de produção textual. Entretanto, ressalta-se que o objeto investigado não se esgota nesta análise, tendo em vista a complexidade que envolve o desenvolvimento do letramento acadêmico e a incorporação de práticas de revisão, reescrita e acompanhamento sistemático no processo de ensino-aprendizagem.

Referências

ALMEIDA, Marcus Vinícius Brotto de. O redator estrategista: uma proposta metacognitiva para o ensino da organização tópica do parágrafo argumentativo. Tese de Doutorado em Letras Vernáculas. Faculdade de Letras, UFRJ, Rio de Janeiro, 2017. BRASILEIRO, Ada Magaly Matias. Como produzir textos acadêmicos e científicos. São Paulo: Contexto, 2021. BOTELHO, Patricia Ferreira. Conhecimento prévio e atividades escolares de leitura: uma abordagem cognitiva e metacognitiva. Tese de Doutorado em Letras Vernáculas. Faculdade de Letras, UFRJ, Rio de Janeiro, 2015. BOTELHO, Patricia; NEVES, Fabiana Esteves. Perspectivas metacognitivas e metalinguísticas para o ensino de leitura e escrita em língua materna. Revista do GELNE, Natal/RN, Vol. 21 - Número 2: p. 189-201, 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. Diadorim, Rio de Janeiro, Revista 19, v. 2, p. 48-75, jul-dez. 2017. GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 6.ed. São Paulo: Atlas, 2017. KEMMIS, Stephen; MCTAGGART, Robin; NIXON, Rhonda. The action research planner: doing critical participatory action research. Singapore: Springer, 2014. KLEIMAN, Angela Bustos. Os significados do letramento: uma nova perspectiva sobre a prática social da escrita. Campinas: Mercado de Letras, 1995. KLEIMAN, Angela Bustos; VIANNA, Carolina Assis Dias; SITO, Luanda Soares; VALSECHI, Marília Curado; GRANDE; Paula Baracat De Grande. O conceito de letramento na produção científica brasileira: retorno às origens, discussões para o futuro. Trabalhos em Linguística Aplicada, Campinas, n(63.1): 240-254, jan./abr. 2024. KOERNER, Rosana Mara; FISCHER, Adriana. A escrita acadêmica em cursos de licenciaturas: o que dizem os professores. Revista Brasileira de Linguística Aplicada, Belo Horizonte, v. 24, n. 4, 2024. NEVES, Fabiana Esteves; BOTELHO, Patricia Ferreira (Orgs.). Metacognição, práticas de leitura e de escrita: repensando estratégias de ensino. Campinas: Pontes Editores, 2024. PAIVA, Vera Lúcia Menezes de Oliveira. Manual de pesquisa em estudos linguísticos. São Paulo: Parábola Editorial, 2019. PALTILA, Luciana Faria Pereira. Didatizando estratégias de revisão e reescrita de texto para o ensino e aprendizagem da escrita. In: NEVES, Fabiana Esteves; BOTELHO, Patricia Ferreira. Metacognição, práticas de leitura e de escrita: repensando estratégias de ensino. Campinas: Pontes Editores, 2024, p. 191-216. SINHA, Chris. Situated Selves: learning to be a learner. In: BLISS, Joan; SÃLJÕ, Roger; LIGHT, Paul. (Eds.) Learning sites: Social and technological resources for learning. Oxford, Pergamon, 1999. Pages 32-48. VARGAS, Diego da Silva. Processos Inferenciais em atividades escolares de leitura e o (re)conhecimento da voz do aluno-leitor. Leitura: teoria & prática, v. 58, p. 2832841, 2012. 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.

CÓDIGO: HS0810

AUTOR: DIOGO ANGELO PESSOA

ORIENTADOR: ALEXSANDRO GALENO ARAUJO DANTAS

TÍTULO: O contemporâneo que vê: análise da mulher do médico em Ensaio sobre a cegueira de José Saramago

Resumo

Esta pesquisa analisa a personagem da mulher do médico em Ensaio sobre a cegueira, de José Saramago, relacionando sua capacidade de enxergar ao conceito de contemporâneo de Giorgio Agamben. A partir de uma pesquisa qualitativa e bibliográfica, são analisados elementos de desumanização e solidariedade presentes na narrativa. A análise busca compreender a personagem como uma figura capaz de perceber criticamente as contradições de seu tempo, reconhecendo tanto suas sombras quanto suas possibilidades de resistência e humanidade.

Palavras-chave: Ensaio sobre a cegueira; José Saramago; Giorgio Agamben; contemporâneo

TITLE: The Contemporary Who Sees: An Analysis of the Doctor's Wife in José Saramago's Blindness

Abstract

This research analyzes the character of the doctor's wife in José Saramago's Blindness, relating her ability to see to Giorgio Agamben's concept of the contemporary. Based on qualitative and bibliographic research, the study examines elements of dehumanization and solidarity present in the novel. The analysis seeks to understand the character as a figure capable of critically perceiving the contradictions of her time, recognizing both its shadows and its possibilities for resistance and humanity.

Keywords: Blindness; José Saramago; Giorgio Agamben; contemporary.

Introdução

Imagine um mundo em que, de repente, todas as pessoas ficam cegas não pela ausência de luz, mas pelo excesso dela. Em Ensaio sobre a cegueira, de José Saramago, encontramos exatamente esse cenário. O livro utiliza esse contexto fictício para explorar profundamente a condição humana diante de uma crise extrema, revelando não apenas

fragilidades sociais, morais e éticas, mas também aspectos intrínsecos da natureza humana. Em meio ao caos instaurado, destaca-se a personagem denominada “mulher do médico”, a única que mantém sua visão, não apenas no sentido literal, mas também simbólico. Dessa forma, estabelece-se um contraste fundamental na narrativa: enquanto os demais personagens perdem a capacidade de enxergar, ela assume o papel de observar, interpretar e agir diante dos acontecimentos. Essa posição permite compreendê-la como um símbolo de consciência crítica, capaz de perceber tanto as calamidades quanto os gestos de humanidade presentes mesmo em situações extremas. Ao longo da narrativa, sua postura evidencia uma tensão constante entre o caos e a preservação de valores éticos, o que a coloca em um lugar de destaque dentro da obra. Nesse sentido, a análise busca articular essa personagem com a noção de contemporâneo proposta por Giorgio Agamben, entendida como a capacidade de reconhecer as tensões e contradições do seu tempo presente, uma arqueologia do presente. A partir dessa perspectiva, busca compreender como a personagem não apenas enxerga o mundo ao seu redor, mas também interpreta criticamente as dinâmicas sociais em colapso.

Metodologia

A pesquisa é de natureza qualitativa, com base em revisão bibliográfica. Foram realizadas leituras de obras literárias e textos teóricos relevantes para o desenvolvimento da análise. A investigação concentra-se na interpretação da obra Ensaio sobre a cegueira, articulando-a com o pensamento filosófico de Giorgio Agamben. A análise ocorre por meio da identificação de passagens significativas e da interpretação crítica das ações e percepções da personagem da mulher do médico. Além disso, busca-se estabelecer relações entre os elementos narrativos da obra e conceitos filosóficos, de modo a construir uma interpretação que considere tanto o contexto literário quanto o teórico.

Resultados e Discussões

RESULTADOS Os resultados mostram que a mulher do médico desempenha um papel central na interpretação da narrativa. Sua condição de única personagem que continua enxergando faz com que ela acompanhe de maneira diferente as mudanças provocadas pela epidemia, funcionando como mediadora entre o caos e a possibilidade de compreensão. No manicômio, espaço de confinamento inicial, podemos observar a rápida deterioração das normas sociais, evidenciada pelo surgimento de comportamentos violentos e autoritários diante do caos. A personagem, ao presenciar tais acontecimentos, não se limita à observação, mas reage de forma ética, buscando preservar a dignidade humana. Em situações de extrema violência, sua postura revela uma consciência que ultrapassa o plano imediato, permitindo uma leitura crítica do processo de desumanização. Sua capacidade de agir em meio ao colapso demonstra não apenas lucidez, mas também resistência diante da perda de valores coletivos. A saída do manicômio marca outro momento significativo, no qual a personagem assume a liderança do grupo. Ao conduzi-los pela cidade devastada, demonstra responsabilidade, empatia e capacidade de decisão, características que reforçam sua posição singular. A cidade, desorganizada e caótica, funciona como extensão do colapso observado

anteriormente, ampliando a percepção da personagem sobre a sociedade. Ao mesmo tempo, a narrativa evidencia que, mesmo em meio ao caos, persistem gestos de solidariedade e cooperação. Essa dualidade entre destruição e resistência constitui um elemento fundamental para a aproximação da personagem com a noção de contemporâneo, uma vez que evidencia a coexistência de diferentes dimensões da experiência humana. Diante disso, é possível identificar, na narrativa, elementos que representam tanto a dimensão da desumanização quanto da resistência humana. Entre os aspectos associados ao "escuro" ou à degradação, destacam-se a violência, o egoísmo e o colapso das normas sociais, evidentes principalmente no período de confinamento no manicômio. Por outro lado, também se observam elementos que remetem ao "claro", como gestos de solidariedade, cuidado e cooperação entre os personagens, especialmente nas ações conduzidas pela mulher do médico. Esses contrastes evidenciam a coexistência de diferentes dimensões da experiência humana, reforçando a complexidade da obra. Essa contradição é importante para relacionar a personagem ao conceito de contemporâneo utilizado na pesquisa. Dessa forma, a personagem pode ser relacionada à concepção de contemporâneo por sua capacidade de perceber criticamente as contradições de seu tempo, reconhecendo tanto aquilo que se apresenta de forma evidente quanto aquilo que permanece oculto ou obscuro. DISCUSSÃO A partir dos resultados observados, é possível compreender a mulher do médico como uma figura que resiste à cegueira não apenas física, mas também simbólica. Sua capacidade de perceber o mundo em sua complexidade sugere uma forma de consciência que ultrapassa a simples visão, envolvendo interpretação crítica e posicionamento diante da realidade. Essa característica aproxima a personagem da noção de contemporâneo, entendida como a capacidade de reconhecer as sombras do presente sem deixar de perceber possibilidades de transformação. A relação entre a visão da mulher do médico e a ideia de contemporâneo também pode ser pensada a partir da oposição entre claro e escuro. Em Agamben, a relação com o próprio tempo não consiste apenas em perceber aquilo que está evidente, mas também em conseguir reconhecer aquilo que permanece obscuro. Nesse sentido, o contemporâneo é aquele que consegue olhar para o seu tempo e perceber não somente aquilo que está iluminado, mas também suas sombras e contradições. Essa ideia pode ser relacionada à situação da personagem. Enquanto os demais personagens estão literalmente cegos, ela consegue enxergar, inclusive nos momentos em que a realidade ao seu redor se torna mais difícil de compreender. Sua visão permite que ela perceba tanto os aspectos mais evidentes da crise quanto aquilo que existe por trás dela: a violência, o egoísmo, o abandono, mas também o cuidado e a solidariedade. Assim, o claro e o escuro podem ser entendidos como uma metáfora para as diferentes dimensões da realidade apresentada no romance. Enxergar não significa simplesmente permanecer no lado "claro" das coisas. Pelo contrário, significa também ser capaz de olhar para o que é difícil, contraditório ou desagradável. É justamente essa capacidade de perceber as sombras do próprio tempo que aproxima a personagem da concepção de contemporâneo de Agamben. A partir dessa perspectiva, a personagem também pode ser compreendida como uma figura que tensiona a passividade diante da realidade. Enquanto muitos personagens sucumbem ao caos ou se adaptam a ele de forma acrítica, a mulher do médico mantém uma postura ativa, o que reforça sua singularidade. Essa atitude evidencia não apenas uma capacidade de percepção, mas também um compromisso ético com o outro, elemento fundamental para a compreensão de sua relação com o conceito de contemporâneo. Dessa maneira, a relação entre Saramago e Agamben não significa afirmar que a personagem seja uma representação direta e exata do conceito filosófico. A aproximação acontece porque ambos permitem pensar sobre a necessidade de perceber as contradições da realidade e sobre a

possibilidade de assumir uma posição diante delas. A obra também pode ser compreendida como um espelho da sociedade. Embora a situação apresentada por Saramago seja fictícia e extrema, os comportamentos observados pelos personagens não são completamente distantes da realidade. A violência, o egoísmo, a busca por poder, mas também a solidariedade e a capacidade de cooperação fazem parte das diferentes formas pelas quais as pessoas se relacionam umas com as outras. Nesse sentido, a cegueira presente no romance não precisa ser entendida apenas como uma condição dos personagens. Ela também pode funcionar como uma forma de questionar a maneira como a própria sociedade percebe seus problemas. Ao retirar dos indivíduos a capacidade de enxergar, Saramago cria uma situação em que comportamentos e relações que normalmente permanecem menos visíveis tornam-se evidentes. A mulher do médico ocupa uma posição importante nesse processo porque é justamente aquela que consegue ver aquilo que os demais não conseguem. Sua perspectiva permite ao leitor acompanhar não apenas o colapso daquela sociedade, mas também suas contradições. O romance apresenta, portanto, tanto aquilo que existe de mais violento quanto aquilo que ainda permite a convivência entre as pessoas. É nesse ponto que a relação com o conceito de contemporâneo se torna mais ampla. Se ser contemporâneo envolve reconhecer as sombras do próprio tempo, a leitura da obra também convida a olhar para as sombras da sociedade em que vivemos. O romance não oferece uma sociedade completamente diferente da nossa, mas uma situação extrema que torna mais visíveis determinados comportamentos e contradições que podem existir também fora da ficção. Dessa forma, a pesquisa não busca afirmar que a sociedade apresentada no romance seja uma representação exata da sociedade real. A obra funciona mais como um espelho que distorce e intensifica determinados aspectos da experiência humana, tornando-os mais fáceis de observar. Ao olhar para esse espelho, torna-se possível questionar aquilo que normalmente permanece no campo do “escuro” e refletir sobre a maneira como enxergamos ou deixamos de enxergar a realidade ao nosso redor.

Conclusão

Esta pesquisa teve como objetivo analisar a mulher do médico em Ensaio sobre a cegueira a partir do conceito de contemporâneo desenvolvido por Giorgio Agamben. A partir da análise realizada, foi possível perceber que a importância da personagem não está somente no fato de ser a única pessoa que continua enxergando durante a epidemia. Sua visão também permite que ela acompanhe as transformações provocadas pelo colapso da sociedade e reconheça diferentes formas de comportamento humano. Ao longo da narrativa, a personagem presencia situações de violência, egoísmo e desumanização, mas também encontra solidariedade, cuidado e cooperação. Essa convivência entre diferentes comportamentos é importante para compreender a complexidade da obra. A relação com Agamben permite interpretar essa capacidade de perceber diferentes aspectos da realidade como uma forma de consciência crítica. A mulher do médico está inserida no mesmo mundo que os outros personagens, mas sua posição permite que ela observe aquilo que está acontecendo e tome decisões diante das circunstâncias. Dessa forma, sua capacidade de enxergar pode ser entendida também de maneira simbólica. Enxergar, nesse caso, não significa apenas possuir visão física, mas ter a capacidade de perceber a realidade, reconhecer suas contradições e agir diante delas. A análise também permite compreender a cegueira do romance como uma possibilidade de reflexão sobre a própria percepção da realidade. A obra mostra que é possível estar diante de acontecimentos importantes e, ainda assim, não necessariamente

compreendê-los ou questioná-los. Assim, a mulher do médico representa uma possibilidade diferente diante dessa cegueira. Ela não consegue solucionar o colapso da sociedade, mas consegue vê-lo, compreendê-lo dentro de suas possibilidades e agir diante dele. A aproximação entre a personagem e o conceito de contemporâneo, portanto, permite compreender a obra de Saramago como uma reflexão sobre a capacidade humana de perceber criticamente seu próprio tempo, especialmente quando esse tempo é marcado por crises, contradições e transformações.

Referências

AGAMBEN, Giorgio. O que é o contemporâneo? e outros ensaios. Chapecó: Argos, 2009. SARAMAGO, José. Ensaio sobre a cegueira. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

CÓDIGO: HS0857

AUTOR: ERICA MIRANDA FREIRE

ORIENTADOR: ALEXSANDRO GALENO ARAUJO DANTAS

TÍTULO: As desilusões de um poeta-jornalista; uma análise interdisciplinar da Obra Ilusões Perdidas de Honoré de Balzac.

Resumo

Este trabalho tem como proposta apresentar uma análise interdisciplinar da obra Ilusões Perdidas, do autor Honoré de Balzac. A investigação transita pela crítica ao jornalismo como um dispositivo de poder-saber e representação, em paralelo com a defesa da potência e da "artesania dos afetos" que circundam a trajetória do protagonista. Defende-se que o principal fator desencadeador das tragédias vividas por Lucien de Rubempré reside na lógica capitalista e mercantilista do mercado das notícias. Demonstra-se que essa dinâmica não se alterou no presente: sob a sociedade do desempenho e do cansaço, continuamos a ser governados pela repercussão e espetacularização de discursos cotidianos que moldam a nossa visibilidade, interferindo diretamente na maneira como somos vistos e como vemos o mundo.

Palavras-chave: Interdisciplinaridade. Jornalismo. Honoré de Balzac. Afetos.

TITLE: The Disillusions of a Poet-Journalist: An Interdisciplinary Analysis of Honoré de Balzac’s Lost Illusions.

Abstract

This paper aims to present an interdisciplinary analysis of Lost Illusions, by Honoré de Balzac. The study explores the critique of journalism as a dispositif of power-knowledge and representation, while also examining the potential and the “craftsmanship of affects” surrounding the protagonist’s trajectory. It argues that the main factor triggering the tragedies experienced by Lucien de Rubempré lies in the capitalist and mercantilist logic governing the news market. Furthermore, it demonstrates that this dynamic has not changed in the present day: within the society of performance and fatigue, we continue to be governed by the circulation and spectacularization of everyday discourses, which shape our visibility and directly interfere with the ways we are perceived and how we perceive the world.

Keywords: Interdisciplinarity. Journalism. Honoré de Balzac. Affects.

Introdução

Honoré de Balzac, escritor e jornalista francês, é conhecido por sua extensa obra literária. Uma que se destaca entre elas e que é o objeto de estudo desta pesquisa é a obra Ilusões Perdidas, onde acompanhamos a trajetória de Lucien, ora Rubempré, ora Chardon. Um jovem escritor e poeta que acredita que o amor e a vida em Paris poderão lhe trazer dinheiro e sucesso. Como o próprio título sugere, não demora para que ele comece a se desiludir e perceber que a vida que ele tanto almejava não é tão glamourosa assim. De fato, o glamour que Lucien tanto almejava só é ganho em cima da exploração de desgraças que acometem outros personagens da obra.

Sob a perspectiva de Byung-Chul Han, essa busca de Lucien pelo sucesso na capital ilustra a transição da sociedade disciplinar para a"sociedade do desempenho", na qual o sujeito, impulsionado pelo imperativo voluntário do "você consegue", submete-se de maneira inconsciente à autoexploração. Ao migrar de Angoulême para Paris em busca de prestígio, Lucien assume a tripla função de patrão, empregado e fiscal de si mesmo, acreditando agir em liberdade quando, na verdade, está preso a um ciclo infinito de produtividade e comparação social que acaba o conduzindo ao esgotamento físico e psicológico.

Essa busca desenfreada pelo topo social também corrompe suas relações afetivas. Como pontua bellhooks, a ênfase cultural na acumulação de bens e no status consome a fome espiritual e destrói a capacidade de vivenciar o amor, evidenciando que a lógica do mercado capitalista e o princípio do amor são incompatíveis. Assim, suas relações amorosas e familiares acabam sendo afetadas.

Os poemas que brilhavam aos olhos de sua amante em Angoulême não são vistos com os mesmos olhos pela sociedade parisiense, que o despreza por sua técnica e pobreza. Ele vai sendo direcionado a conhecer amigos que mais tarde o apresentam ao mundo do jornalismo. Investigar e identificar os elementos dos dispositivosfoucaultianos que transpassam os personagens da obra é o exercício de um pensamento interdisciplinar. O jornalismo na Paris de Balzac opera como um verdadeiro dispositivodepoder-saber. Nele, os discursos não são neutros; ao contrário, o poder-saber produz realidades, fabrica subjetividades e estabelece rituais de verdade. As cenas cotidianas de Lucien e da Sra. de Bargeton revelam uma microfísica do poder na qual os indivíduos afetam uns aos outros por meio de uma rede contínua de relações e olhares fiscalizadores.

Para dar conta dessa complexidade, a literatura mostra-se uma ferramenta transformadora e indispensável nas ciências humanas. De acordo com EdgarMorin, enquanto as ciências humanas tradicionais muitas vezes ocultam ou dissolvem os caracteres existenciais, afetivos e subjetivos do ser humano, é o romance do século XIX — de Balzac a Dostoiévski — que tem a virtude de restituir e revelar a complexidade humana que se esconde sob as aparências.

Assim, através da luz de Michel Foucault, Byung-Chul Han, bell hooks, Edgar Morin e Geni Núñez, proponho neste trabalho uma visão interdisciplinar que permite ligar saberes que parecem distintos. Essa abordagem mescla a vida poética e prosaica de Lucien de Rubempré, rodeada por conflitos de trabalho, mas também por demonstrações de afeto. Lucien experiencia a contradição de acreditar que só será verdadeiramente amado se alcançar dinheiro e sucesso, embora seus principais afetos — sua família — tenham sido justamente aqueles que mais o apoiaram e lhe demonstraram que ele é amado, inclusive

nos momentos de maior miséria. Resgatar a humanidade de Lucien significa analisar sua trajetória não sob a perspectiva culpabilizante do fracasso individual, mas como uma busca por dignidade e por uma "artesania dos afetos" que resiste à exaustão e à desumanização do seu tempo.

Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida a partir da leitura e análise da obra Ilusões Perdidas, acompanhada da elaboração de anotações e reflexões registradas em um diário de bordo. Esse material permitiu organizar as impressões, observações e questões surgidas ao longo da leitura, contribuindo para o desenvolvimento das análises realizadas durante a pesquisa.

O desenvolvimento do trabalho também contou com o acompanhamento do professor orientador, por meio da apresentação periódica dos resultados parciais e da discussão das questões e hipóteses construídas ao longo da pesquisa. As orientações contribuíram para o direcionamento das análises e para a delimitação dos caminhos seguidos durante o processo de investigação.

A fundamentação teórica foi construída a partir de leituras realizadas pela pesquisadora, incluindo tanto textos selecionados autonomamente quanto obras e discussões abordadas ao longo do Bacharelado Interdisciplinar em Humanidades. Também foram incorporadas leituras recomendadas durante as orientações coletivas e palestras promovidas pelo grupo de pesquisa Marginália, do qual o professor orientador é um dos organizadores.

Resultados e Discussões

"Nem o moleiro nem a moleira podiam desconfiar que, além do ator, do príncipe e do bispo, há um homem que, ao mesmo tempo, é príncipe e ator, um homem revestido de um magnífico sacerdócio, o Poeta, que parece não fazer nada e, no entanto, reina sob a humanidade quando sabe pintá-la." (BALZAC, 2011, p. 549)."

Balzac é completamente crítico à existência da profissão do jornalismo e deixa isso bem claro ao longo do romance. Com cenas em que os jornalistas são responsáveis por atos perversos, dignos de vilania, o autor antecipa o que Michel Foucault descreve como o uso do discurso e da informação às engrenagens do controle social. O jornalismo na escrita de Balzac, ao espetacularizar vidas privadas e lucrar com calúnias, opera nos moldes do "noticiário policial" de época:"alimentando-se de sangue" e "de prisão", funcionando como uma técnica de poder-saber que enquadra existências para sujeitá-las ao julgamento da opinião.

É sob uma trágica complexidade moriniana que se desenha a trajetória de Lucien de Rubempré, um jovem nascido em Angoulême, no interior da França. Filho de um farmacêutico que morre cedo, sua mãe e sua irmã se dedicaram à sua criação, garantindo

que Lucien tivesse o acesso necessário ao conteúdo que o fizesse ascender em seu trabalho: a poesia. Essa dedicação familiar absoluta estabelece o lar de Lucien como aquilo que bell hooks define como a "primeira escola do amor", onde o cuidado e o afeto deveriam nutrir a autoconfiança do indivíduo. No entanto, sob a lógica do mercado capitalista, os sacrifícios da família nuclear são atravessados pela necessidade de ascensão social. Geni Núñez sinaliza que o capitalismo colonial propaga a mentira de que só somos dignos de afeto e respeito se alcançarmos o "primeiro lugar". Lucien, assim, passa a enxergar sua poesia não apenas como a arte que ela é, mas como uma possível forma de obter dinheiro necessário para validar sua existência e retribuir a sobrecarga de trabalho de sua mãe, irmã e seu amigo e cunhado, David.

Por ser talentoso, o jovem acaba sendo convidado constantemente para visitar e fazer apresentações na casa da Sra. de Bargeton, pela qual acaba se apaixonando, o que não resulta em uma história de amor; pelo contrário, desencadeia uma série de tragédias que o acompanharão ao longo de sua saga, almejando ser reconhecido pela escrita. Lucien enfrenta constantemente o anseio em ser reconhecido como Lucien de Rubempré, nome nobre que vem de sua mãe, mas cuja nobreza foi perdida por se casar com seu pai, que era pobre. É aí que vemos uma dicotomia interessante de Lucien, que também é o que o faz buscar o dinheiro que tanto lhe falta: ele não quer ser Chardon, quer ser Rubempré. Esse anseio reflete com precisão a mudança no "eixo político da individualização" descrita por Foucault. O nome paterno, Chardon, evoca a individualização descendente, na qual os sujeitos desprovidos de recursos são catalogados, medidos e controlados pelo poder disciplinar como simples "peões em um tabuleiro". Recusando esse destino ordinário, Lucien busca na linhagem materna, Rubempré, a chave para a individualização ascendente foucaultiana, onde o indivíduo extraordinário se eternizava por meio de genealogias, nomes de prestígio e brasões de soberania. Todavia, ao internalizar essa busca obsessiva por nobreza como uma obrigação pessoal para alcançar seus objetivos, incluindo ter seu relacionamento com a Sra. de Bargeton reconhecido, Lucien converte-se no sujeito da "sociedade do desempenho" de Byung-Chul Han. Sob o imperativo invisível do "você consegue", ele abdica de sua própria liberdade para se submeter a um ciclo de autoexploração, atuando simultaneamente como "patrão, empregado e fiscal de si mesmo" rumo ao próprio esgotamento.

Sua primeira esperança surge quando Louise — apelido pelo qual a Sra. De Bargeton pede para ser chamada por ele — o convida para viajar até Paris como seu acompanhante. Nessa parte da história, os dois já são assumidamente amantes, mas, para não escandalizar a sociedade, Lucien acaba dormindo em um apartamento diferente e mais pobre que o da sua amada. Essa distância é mais que física; acaba sendo só um dos detalhes que fazem Lucien perceber que, não importa o quanto ame Louise, ela nunca o colocará no mesmo patamar que o seu pelas diferenças sociais. Louise não é uma mulher romântica; pelo contrário, tomada pelos conselhos de sua prima, a Srta. d'Espard, ela entende que até mesmo a alta sociedade tem suas diferenças dentro dela. Como que seu modo de se vestir evidencia que ela não é uma cidadã parisiense, e que, assim como seus vestidos, ela precisa se livrar de Lucien para ser aceita nesse novo universo.

"(...) É certo que dois amantes costumam se separar mais rápido do que se uniram. Preparava-se não Sra. de Bargeton e em Lucien um desencanto com eles mesmos cuja causa era Paris. Aos olhos do poeta, a vida ali se ampliava, assim como, aos olhos de Louise, a sociedade assumia um novo semblante. Para um e outro, não era preciso mais que um acidente para cortar os laços que os uniam. Essa machadada, terrível para Lucien, não demorou a chegar. A Sra. de Bargeton deixou o poeta em seu hotel e voltou

para casa acompanhada de Du Châtelet, o que desagradou terrivelmente ao pobre apaixonado."(BALZAC, 2011, p. 190).

Essa dinâmica de descarte afetivo expõe como as relações humanas sob o capitalismo são desumanizadas e mercantilizadas. Como discute bell hooks, quando a política da ganância e os valores de mercado orientam as atitudes em relação ao amor, as pessoas passam a ser tratadas como meros objetos de utilidade. Louise trata Lucien sob a lógica do "copo descartável": o afeto é subordinado às táticas de poder da alta sociedade parisiense. Ao perceber que a presença de Lucien compromete sua aceitação social, Louise adota o cinismo pragmático do mercado, que prescreve que "se o parceiro não está satisfazendo suas necessidades de status, você deve se livrar dele", sacrificando o "amor" em nome do prestígio.

Lucien, por sua vez, que ingenuamente deixou tudo para trás quando Louise o convidou para ir a Paris, não levou só os seus recursos, mas também os de sua mãe e sua irmã, que estava prestes a se casar com seu amigo, David, outro personagem importantíssimo da obra e que, por muito tempo, é visto como a voz da razão. A crença de Lucien é que Paris estaria de portas abertas para ele e seus escritos e, assim, ele teria a chance de ganhar dinheiro com seu livro. Quando Louise o descarta, ele se vê perdido, já que, para acompanhá-la, acaba gastando boa parte do seu dinheiro em roupas.

Ao acabar com os recursos da sua família em um piscar de olhos, Lucien é arrastado pela fantasia de enriquecimento rápido legitimada pelo capitalismo. Sob a ótica de Morin, Lucien ilustra a dicotomia do ser humano que é, simultaneamente, Homosapiens (racional) e Homodemens (delirante, dominado por paixões e ilusões quiméricas). Enquanto David representa a autocrítica e a racionalidade reflexiva necessárias para a lucidez, Lucien se deixa levar por uma retroação amplificadora de suas próprias ilusões, acreditando que o consumo estético de roupas luxuosas e a aprovação de Paris preencheriam seu vazio existencial e sua fome espiritual.

Sozinho em Paris e desamparado por não poder contar mais com o dinheiro que a família havia mandado, já que gastou tudo, Lucien acaba se hospedando em um lugar equivalente a um hostel, onde conhece outros jovens escritores assim como ele, só que, diferente dele,eles já estão justamente no mercado do jornalismo. É justamente a essa altura da vida que ele conhece seu grande amigo Lousteau, que o acompanhará na sua jornada no jornalismo.

O espaço coletivo dessa hospedagem barata funciona como um dispositivo de cercamento e distribuição disciplinar de corpos marginalizados. Como observa Foucault ao estudar o confinamento de jovens rebeldes ou infratores, é no interior desses espaços de reclusão coletiva que se formam "clubes" informais nos quais "é feita a educação do jovem... para aprender com os colegas hábeis" as táticas de sobrevivência e delinquência do meio. Ao se deparar com Lousteau nesse confinamento marginal, Lucien não encontra uma comunidade de acolhimento genuíno, mas sim uma rede de sujeitos movidos pela necessidade de sobrevivência e pela comparação constante. Lousteau assume o papel desse "colega hábil" de cárcere, guiando Lucien para dentro da engrenagem do jornalismo perverso e completando a transição do jovem poeta (Homopoeticus) em um instrumento dócil e produtivo do poder da imprensa.

A jornada do herói vai se intensificando conforme seus interesses pessoais se entrelaçam aos da empresa na qual ele consegue um emprego, evidenciando as nuances do jornalismo. Balzac deixa bem claro ao longo da sua obra como, na visão dele, o jornalismo é uma profissão que tem uma faca de dois gumes, tanto para beneficiar como

para prejudicar a vida das pessoas. Essa ambiguidade do jornalismo como engrenagem social exemplifica o que Michel Foucault conceitua como um poder relacional que se autossustenta e funciona de maneira contínua por todo o corpo social. Em Ilusões Perdidas, a imprensa não se apresenta como um espaço neutro de debate, mas como um dispositivo de poder-saber que fabrica verdades e as dissemina sistematicamente para enquadrar o comportamento da opinião pública.

Isso fica claro em um diálogo que ele tem com seus colegas escritores, em que eles o alertam sobre os perigos do jornalismo e como ele, que tinha tudo para ser um bom escritor de poesias e romances, tinha tudo para ter sua alma corrompida caso se rendesse ao jornalismo. Sob a ótica de Edgar Morin, esse alerta reflete o violento conflito entre o Homopoeticus — o ser destinado à dimensão poética da existência, ao deslumbramento e à qualidade estética da vida — e o Homoprosaicus, que subordina a subjetividade às necessidades utilitárias, burocráticas e funcionais do mercado. Render-se ao jornalismo parisiense significa, para Lucien, abdicar de sua vocação poética em prol de um sistema que neutraliza a autonomia criativa para produzir corpos dóceis e úteis à engrenagem do capital.

Ironicamente, isso realmente acontece. Depois de diversos momentos de portas fechadas, quando Lucien finalmente começa a dar sinais de que conseguirá ascender socialmente, isso é graças ao seu trabalho no jornalismo, que inclui escrever três artigos diferentes, a depender de qual será a opinião do público sobre um determinado evento: positivo, negativo ou neutro. Essa exigência de flexibilidade ideológica demonstra como a escrita perde seu caráter reflexivo para se tornar um mero instrumento operacional. Na perspectiva de Byung-Chul Han, essa cobrança por uma adaptabilidade irrestrita é típica da transição para a "sociedade do desempenho", na qual o indivíduo é compelido a estar permanentemente disponível e a produzir de forma hiperativa, transformando o próprio pensamento em uma mercadoria moldável.

Na sociedade parisiense, talento não é o suficiente para garantir que você terá sucesso. Na página 426, em que Lucien está com alguns de seus colegas, há um diálogo interessante que evidencia que, no jornalismo, a performance do seu artigo é mais importante do que o conteúdo presente nele.

“Então você dá importância ao que escreve? — perguntou-lhe Vernou de um jeito zombeteiro — Mas nós somos mercadores de frases e vivemos de nosso comércio. Quando quiser fazer uma grande e bela obra, um livro, enfim, poderá expressar seus pensamentos, sua alma, afeiçoar-se a ele, defendê-lo; mas artigos lidos hoje, esquecidos amanhã, ao meu ver só valem o quanto se paga por eles. Se der importância a essas imbecilidades, então fará o sinal da cruz e invocará o Espírito Santo para escrever um prospecto!”(BALZAC, 2011, p. 426).

A disseminação de fake news, na qual se sustenta a vida dos jornalistas de Paris citados na obra, é o exemplo mais claro de que as táticas de poder a partir dos conceitos foucaultianos apenas se atualizam. A palavra polêmica é citada como o pedestal das celebridades, evidenciando a dualidade da fofoca. Tal qual mais tarde nos é apresentado o termo Canard — dito como “um fato que parece verdadeiro que é inventado para apimentar os fatos de Paris quando estão muito sem graça” —, o jornalismo balzaquiano utiliza as notícias como um jogo de representações e sinais para captar a opinião pública

e alimentar o sistema de poder. O Canard assemelha-se ao que MichelFoucault identifica na literatura e na imprensa de crimes da época: a utilização de relatos biográficos e crônicas cotidianas não para heroificar, mas como uma técnica de poder voltada para a sujeição, a objetivação e o controle social dos indivíduos.
Esse diálogo exemplifica isso com precisão ao ilustrar o que Foucault caracteriza como a "decomposição individualizante da força de trabalho", onde os sujeitos tornam-se elementos intercambiáveis e descartáveis dentro de um aparelho de produção estritamente mecânico. O escritor deixa de ser um autor memorável e passa a ser uma engrenagem que faz a roda da imprensa girar, atendendo às suas demandas quantitativas e exaustivas. Para Han, essa lógica de Vernou condensa a dinâmica do cansaço e do esgotamento da era moderna: a produção intelectual é despida de sua profundidade e o tempo de descanso ou reflexão demorada é visto como perda de tempo, restando apenas um vazio produtivo onde os artigos são "lidos hoje e esquecidos amanhã".
Essa engrenagem mercadológica e o cinismo de Vernou ilustram o que Alex Galeno e Gustavo de Castro definem como o "barateamento das ideias pela imprensa" e a histórica "confusão entre informação e conhecimento" retratadas na obra balzaquiana. Ao ceder a esse sistema, Lucien experimenta a transição em que a potência estética e reflexiva de sua escrita é sufocada pelas demandas financeiras e pelo imediatismo dos pequenos jornais parisienses. Sob a perspectiva da "literatura de complexidade", essa perda da profundidade artística demonstra como os interesses comerciais e políticos da imprensa comercial desviam o escritor de sua vocação, consolidando o diagnóstico de que Lucien, ao se tornar um instrumento dócil desse mercado, acaba inevitavelmente por "perder a alma"
Algo que merece ser discutido na obra é a relação capitalista de Lucien e que é o principal motor de suas ambições. Lucien quer ser rico, disso não há dúvidas, e é algo que ele deixa bem claro desde o início da obra. Entretanto, a forma como ele quer ficar rico é através da sua escrita, e é essa a sua principal desilusão.
Essa contradição central na trajetória do protagonista expõe o diagnóstico de Erich Fromm, citado por bell hooks, de que "o princípio que alicerça a sociedade capitalista e o princípio do amor são incompatíveis". No caso de Lucien, essa incompatibilidade se estende à sua relação com a própria arte: ao tentar mercantilizar sua potência poética, ele cai na armadilha de um sistema voltado para o consumo e o acúmulo material, que tenta preencher o vazio e a "fome espiritual" por meio de bens e status. Segundo Han, ao basear sua liberdade e autoestima estritamente na capacidade de converter sua escrita em riqueza rápida, Lucien submete-se de forma voluntária à autoexploração neoliberal, onde o indivíduo assume o papel de carrasco de si mesmo e interpreta as barreiras impostas pela própria estrutura social como um fracasso de cunho puramente individual.
Se tivesse permanecido em Angoulême, Lucien talvez tivesse continuado sua vida de poeta, talvez tivesse recebido um pouco mais de reconhecimento. São diversos “talvez” que a parte poética da obra nos deixa refletir e teorizar, mas uma coisa é certa: em Angoulême, Lucien tinha seus afetos de uma forma muito mais firme do que em Paris. Talvez a desvalorização desses afetos tenha sido mais um dos elementos que levou Lucien à ruína. Os esforços da sua mãe, sua irmã e seu cunhado não foram suficientes para que Lucien os valorizasse.
A desintegração dos laços de Lucien ao migrar para a capital revela como a política da ganância pode desestabilizar uma rede de apoio sólida sob uma ética de cuidado coletivo. Ao negligenciar o suporte de sua família e de seu cunhado David em nome da busca desenfreada por prestígio, Lucien se isola, e hooks aponta que a solidão e a alienação são as causas centrais do desespero e da depressão em uma sociedade que valoriza as coisas acima das pessoas.

Numa lógica monogâmica da nossa sociedade, Lucien continuava sentindo a necessidade de ter outros amores ao seu redor além desses. Não é à toa que, mesmo quando deixa sua antiga paixão, a senhora de Angoulême, para trás, logo encontra seu novo amor em Coralie. Talvez numa necessidade de preencher algo que falta em si, buscando no outro, já que Lucien é um personagem humanamente incongruente, com seu orgulho, seu egoísmo e, ainda assim, tão frágil quanto uma criança.

Essa busca incessante por novos parceiros para aplacar um sentimento de insuficiência reflete o que Geni Núñez chama de "monocultura dos afetos". Sob a influência do amor romântico colonial, Lucien projeta no outro a promessa ilusória de que todas as suas faltas existenciais e necessidades de autoestima seriam supridas por uma única pessoa ou por um envolvimento idealizado. Quando essa fantasia inevitavelmente se frustra, Lucien passa a tratar seus relacionamentos sob a lógica capitalista de descarte afetivo analisada por bell hooks: os parceiros são convertidos em "copos descartáveis", objetos que são consumidos, usados e descartados de acordo com a conveniência.

Essa fragilidade e as contradições íntimas de Lucien fazem dele, contudo, um ser profundamente verossímil. Como observa Morin, o romance do século XIX tem o milagre cognitivo de revelar a complexidade da condição humana ao demonstrar que o Homo sapiens é indissociavelmente Homo demens. Lucien convive permanentemente com a razão e o delírio, com o orgulho soberano e a debilidade infantil, evidenciando as profundas instabilidades da identidade e as multiplicidades internas que nos constituem e que as ciências humanas tradicionais muitas vezes tentam fragmentar ou catalogar sob conceitos reducionistas.

E isso é uma das coisas que torna a escrita do personagem Lucien tão interessante. Suas ambições não são gigantescas; na verdade, chega até a ser cômico como parecem ser as mesmas da maioria dos estudantes de humanas na atualidade, reflexo de uma sociedade capitalista e cada vez mais acelerada que mata a criatividade dos Luciens da vida, submetendo-os muitas vezes a escolher outros caminhos ao invés das suas “poesias”. Esse paralelo contemporâneo expõe de forma brilhante a atualidade da crítica balzaquiana. A mercantilização e a aceleração que corroeram o talento de Lucien são as mesmas que caracterizam a sociedade do cansaço contemporânea descrita por Han, em que o ritmo natural da vida e do pensamento criativo é esmagado pelas exigências de uma produtividade ininterrupta e medicalizada. Na contemporaneidade, como salienta Morin, o "mundo técnico e científico" relega a cultura das humanidades ao papel de mero luxo estético ou ornamento supérfluo. Os estudantes de ciências humanas de hoje, tal qual Lucien de Rubempré, vêem-se encurralados pela necessidade de sobrevivência e pela hiperespecialização de uma sociedade utilitária. São frequentemente forçados a silenciar seu Homopoeticus para se submeterem a caminhos prosaicos que sufocam a sensibilidade artística, transformando o potencial emancipador da literatura e do pensamento crítico em mais uma engrenagem dócil do mercado de consumo.

Conclusão

Diante da trajetória de Lucien, podemos concluir que, apesar de os tempos terem mudado — já que a história foi publicada entre 1837 e 1843 —, o mundo jornalístico continua sendo movido por polêmicas, fofocas e vigarices que colocam não só suas vítimas em situações vexatórias, mas também revelam o jornalista como uma engrenagem dentro da

sociedade, capaz de fazer com que determinadas notícias sejam perpetuadas e de influenciar os acontecimentos de acordo com os interesses daqueles que as produzem. Hoje, o jornal impresso foi substituído pelo celular e pelas redes sociais. Apesar de o dispositivo ter mudado, continuamos observando a repetição de um mesmo ciclo: notícias são produzidas por pessoas que são pagas para isso, enquanto a capacidade que uma informação possui de interferir na sociedade é frequentemente subestimada. Os novos jornalistas, além dos tradicionais, podem ser encontrados nas páginas de fofoca e entre os influenciadores digitais que, através desses novos meios de comunicação, utilizam estratégias que muitas vezes parecem pequenas e inocentes. Entretanto, é justamente o processo de repetição e repercussão que faz com que a velocidade com que uma notícia se espalha seja cada vez maior. Como consequência, surge uma das grandes dificuldades da sociedade atual: distinguir o que é realidade e o que é ficção. Essa incerteza pode gerar até mesmo um sentimento de alienação diante das notícias, pois, se já não sei o que é real e o que não é, por que me esforçaria para descobrir? A crítica de Balzac não se limita ao jornalismo de seu tempo, mas nos permite refletir sobre a transformação da informação em mercadoria e sobre o poder daqueles que a produzem e a fazem circular. Se Lucien se depara com um universo em que sua escrita precisa atender a interesses econômicos e políticos para que ele consiga ascender socialmente, nós vivemos hoje em uma sociedade em que a informação circula em uma velocidade ainda maior, disputando constantemente nossa atenção. Assim, mais de um século depois, a trajetória de Lucien continua nos fazendo questionar não apenas quem produz aquilo que lemos, mas também quais interesses existem por trás daquilo que escolhemos acreditar.

Referências

BALZAC, Honoré de. **Ilusões perdidas**. Tradução de Rosa Freire d'Aguiar. São Paulo: Penguin Classics Companhia das Letras, 2011.

FOUCAULT, Michel. **Vigiar e punir**: nascimento da prisão. Tradução de Raquel Ramalhete. 20. ed. Petrópolis: Vozes, 1999.

GALENO, Alex; CASTRO, Gustavo de. **Balzac e a Literatura de Complexidade**. Global Journal of Human-Social Science, v. 22, n. 6, p. 1-11, 2022.

HAN, Byung-Chul. **Sociedade do cansaço.** Tradução de Enio Paulo Giachini. Rio de Janeiro: Editora Vozes, 2024.

HOOKS, bell. **Tudo sobre o amor:** novas perspectivas. Tradução de Stephanie Borges. São Paulo: Editora Elefante, 2021.

MORIN, Edgar. **A cabeça bem-feita:** repensar a reforma, reformar o pensamento. Tradução de Eloá Jacobina. 8. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

NÚÑEZ, Geni. **Descolonizando afetos:** experimentações sobre outras formas de amar. São Paulo: Paidós / Planeta do Brasil, 2023.