

PESQUISAS NO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS, ENGENHARIAS E ARQUITETURA-UFJF

VOLUME 2

Organização:
Marco Kistemann,
Bárbara Almeida e
Eder Kapisch

Akademy
EDITORA

**MARCO AURÉLIO KISTEMANN JR.
BÁRBARA L. ALMEIDA
EDER BARBOZA KAPISCH
(ORGS.)**

**PESQUISAS NO INSTITUTO
DE CIÊNCIAS EXATAS,
ENGENHARIAS E
ARQUITETURA – UFJF –
VOLUME 2**

Ak**demy**
EDITORA
2026

Copyright © 2026 Editora Akademy
Editor-chefe: Celso Ribeiro Campos
Diagramação e revisão: Editora Akademy
Capa: Davi Eduardo Fiuza Abras de Melo

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

K61p

Kistemann Junior, Marco Aurélio; Almeida, Bárbara
Lucia de; Kapisch, Eder Barboza (organizadores)
Pesquisas no Instituto de Ciências Exatas,
Engenharias e Arquitetura - UFJF - volume 2.
São Paulo: Editora Akademy, 2026.

Vários autores
Bibliografia
ISBN 978-65-80008-

1. Pesquisa 2. Divulgação Científica 3. Ciências Exatas
4. Engenharia 5. Química
I. Título

CDD: 620

Índice para catálogo sistemático:
1. Engenharia 620

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação
poderá ser reproduzida por qualquer meio sem a prévia
autorização da Editora Akademy.

A violação dos direitos autorais é crime estabelecido na Lei n.
9.610/98 e punido pelo artigo 184 do Código Penal.

Os autores e a editora empenharam-se para citar adequadamente e
dar o devido crédito a todos os detentores dos direitos autorais de
qualquer material utilizado neste livro, dispondo-se a possíveis
acertos caso, inadvertidamente, a identificação de algum deles
tenha sido omitida.

Editora Akademy – São Paulo, SP

Corpo editorial

Alessandra Mollo (UNIFESP-CETRUS)
Ana Hutz (PUC-SP)
Ana Lucia Manrique (PUC-SP)
André Galhardo Fernandes (UNIP)
Andréa Pavan Perin (FATEC)
Antonio Correa de Lacerda (PUC-SP)
Aurélio Hess (FOC)
Camila Bernardes de Souza (UNIFESP/EORTC/WHO)
Carlos Ricardo Bifi (FATEC)
Cassio Cristiano Giordano (FURG)
Claudio Rafael Bifi (PUC-SP)
Daniel José Machado (PUC-SP)
Fernanda Sevarolli Creston Faria Kistemann (UFJF)
Francisco Carlos Gomes (PUC-SP)
Freda M. D. Vasse (Groningen/HOLANDA)
Heloisa de Sá Nobriga (ECA/USP)
Jayr Figueiredo de Oliveira (FATEC)
José Nicolau Pompeo (PUC-SP)
Marcelo José Ranieri Cardoso (PUC-SP)
Marco Aurelio Kistemann Junior (UFJF)
Maria Cristina Kanobel (UTN – ARGENTINA)
Maria Lucia Lorenzetti Wodewotzki (UNESP)
Mario Mollo Neto (UNESP)
Mauro Maia Laruccia (PUC-SP)
Michael Adelowotan (University of JOHANNESBURG)
Océlio de Jesus Carneiro Morais (UNAMA)
Paula Gonçalves Sauer (ESPM)
Roberta Alves Barbosa (PUC-SP)
Sandra Gonçalves Vilas Bôas (UNIUBE)
Tankiso Moloi (University of JOHANNESBURG)

Este livro foi avaliado e aprovado por pareceristas ad hoc.

Sumário

Prefácio.....	06
<i>Paulo Barone</i>	
Apresentação.....	10
<i>Marco Kistemann, Bárbara Almeida e Eder Kapisch</i>	
1- TV Box Descaracterizadas para Educação: Jogos Cognitivos e Programação como Ferramentas de Inclusão Digital.....	13
<i>Danilo Pereira Pinto, Eder Barboza Kapisch, Exuperry Barros Costa, Júlia Amélia da Silva Paiva</i>	
2- Qual é a natureza da Ciência?.....	33
<i>Guilherme de Berredo-Peixoto, Alice da Silva de Martin</i>	
3- Cianotipia e o desafio da lavagem: efeitos de alguns agentes de limpeza sobre o Azul da Prússia.....	40
<i>Bárbara Lúcia de Almeida, Cassiane Evangelista de Souza, Fernanda Ximendes Ennes</i>	
4- Desenvolvimento de um laser de Titânio: safira de femtosegundos	51
<i>Isis Lee da Silva, Giovana Trevisan Nogueira</i>	
5- Determinação da variação do índice de refração da água em função de sua temperatura utilizando o interferômetro de Michelson	70
<i>Luiz Antônio Silva de Oliveira, Wallon Anderson Tadaiesky Nogueira, Ivan Ferreira dos Santos</i>	
6- Desenvolvimento e validação de sistema experimental aplicado no controle de vibrações de protótipo de edificio utilizando elementos de Liga com Memória de Forma (LMF)	85
<i>Yuri José Oliveira Moraes, Raphael Lima Miranda Gonçalves Fagundes, Bruno Santiago dos Santos Mendes</i>	

7- Material particulado atmosférico: determinação de elementos-traço e implicações ambientais.....	105
<i>Aparecida Maria Simões Mimura, Eduardo de Oliveira Lima, Cássia de Castro Martins Ferreira, Júlio César José da Silva</i>	
8- Estudos teórico e prático dos processos transitórios de carga e descarga de um tanque de gás comprimido.....	127
<i>Marco Aurélio da Cunha Alves, Daniel de Almeida Fernandes</i>	
9- Futuros engenheiros mecânicos conduzem estudo e produção de prótese transtibial como parte da extensão universitária	145
<i>Rafael Welerson Sott Meyer, Yipsy Roque Benito</i>	
10- Rejeitos da Samarco e espécies forrageiras: uma revisão crítica sobre a caracterização físico-química e a mitigação ambiental	164
<i>Paola Ramos Coutinho Reis, Lilian Lúcia Rocha e Silva, Jairo Tronto, Leônidas Paixão Passos, Júlio César José da Silva</i>	
11- Produto Educacional sobre o desenvolvimento de vídeo educacional como recurso de prática formativa para professores.....	183
<i>Daniele Dias Pereira, Marco Aurélio Kistemann Jr.</i>	
12- Desafio Espacial: um modelo detalhado de educação espacial prática para o Ensino Médio público brasileiro com desenvolvimento e lançamento de picossatélite	202
<i>Matheus Six Madureira Guedes, Rafael Paiva Lôbo, Victor Baptista, Leonardo Souza, Paulo M. V. B. Barone</i>	
13- Desenvolvimento de uma matriz de sensores de pixels ativos usando o PDK Sky130 e ferramentas de código aberto.....	215
<i>Luís Karlos Mendes de Oliveira, Estêvão Coelho Teixeira, Filipe Vinci dos Santos</i>	
14- Estudo comparativo da degradação de tebutiuron através da fotocalálise heterogênea utilizando-se dióxido de titânio (TiO ₂) e óxido de zinco (ZnO).....	240
<i>Thaís Fernandes Xavier, Samuel Rodrigues Castro, Jonathas Batista Gonçalves Silva, Júlio Cesar José da Silva, Lilian Lúcia Rocha e Silva</i>	

Prefácio

Em 2025, por iniciativa de Marco Aurélio Kistemann, Bárbara Lúcia de Almeida e Igor Delgado de Melo, foi publicado o livro *Pesquisas no Instituto de Ciências Exatas, Engenharias e Arquitetura – UFJF*, reunindo 11 capítulos que apresentavam resultados de projetos de iniciação científica e tecnológica, iniciação à docência e extensão. Aquela publicação foi o primeiro passo para uma série dedicada a registrar e divulgar a produção acadêmica em STEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática) na Universidade Federal de Juiz de Fora, com atenção especial à participação de estudantes em atividades de Pesquisa, Desenvolvimento e Educação em Ciências.

Este segundo volume dá continuidade a essa proposta, agora com 14 capítulos, mantendo o foco em atividades desenvolvidas nas áreas de Ciências Exatas e Engenharias. A proposta para esta série de publicações se firma, assim, como um espaço de sistematização e divulgação para uma dimensão central da missão universitária: formar, por meio da participação em projetos acadêmicos, egressos capazes de atuar em um mundo estruturado pela ciência e pela tecnologia.

A relevância da formação em STEM no Brasil decorre, por um lado, da necessidade de ampliar a base científica e tecnológica do país, condição para uma inserção mais central na economia global; por outro, da urgência em enfrentar desafios internos como a formação de estudantes na Educação Superior capazes de enfrentar desafios relacionados à realidade nacional, fortemente marcada por desigualdades sociais, vulnerabilidades ambientais e fragilidades na infraestrutura produtiva. A UFJF, como Universidade Pública Federal, ocupa posição estratégica nesse cenário. Ao articular formação, pesquisa e extensão em projetos que envolvem estudantes de graduação e pós-graduação, a instituição contribui para a construção de competências técnicas avançadas, mas também para o desenvolvimento de capacidades críticas, éticas e sociais, indispensáveis à atuação profissional em STEM.

Os capítulos deste volume ilustram esse processo de forma concreta. O texto de Danilo Pereira Pinto, Eder Barboza Kapisch, Exuperry Barros Costa e Júlia Amélia da Silva Paiva aborda o uso de TV Box descaracterizadas em jogos cognitivos e programação para fins de inclusão digital, explorando a

reutilização criativa de dispositivos e o desenvolvimento de pensamento computacional em contextos de recursos limitados. Em seguida, o capítulo de Guilherme de Berredo-Peixoto e Alice da Silva de Martin discute a natureza da Ciência, convidando estudantes e professores a refletir sobre fundamentos epistemológicos, limites e implicações sociais do conhecimento científico, tema ainda pouco explorado na formação acadêmica tradicional.

Os trabalhos de Bárbara Lúcia de Almeida, Cassiane Evangelista de Souza e Fernanda Ximendes Ennes, sobre cianotipia e agentes de limpeza, e de Isis Lee da Silva e Giovana Trevisan Nogueira, sobre a montagem de um laser de titânio:safira de femtossegundos, evidenciam como atividades experimentais permitem integrar Química e Física ao desenvolvimento de aplicações, protocolos e à construção de equipamentos nos laboratórios de pesquisa. De modo complementar, o capítulo de Luiz Antônio Silva de Oliveira, Wallon Anderson Tadaiesky Nogueira e Ivan Ferreira dos Santos, ao estudar a variação do índice de refração da água com a temperatura por meio de um interferômetro de Michelson, reforça a importância da metrologia e da precisão experimental na formação em Ciências Exatas.

Na área de Engenharia, o texto de Yuri José Oliveira Moraes, Raphael Lima Miranda Gonçalves Fagundes e Bruno Santiago dos Santos Mendes apresenta o desenvolvimento e a validação de um sistema experimental para controle de vibrações em protótipo de edifício usando ligas com memória de forma, aproximando estudantes de problemas relacionados à segurança e ao desempenho estrutural na construção civil. Os capítulos de Aparecida Maria Simões Mimura, Eduardo de Oliveira Lima, Cássia de Castro Martins Ferreira e Júlio César José da Silva, sobre material particulado atmosférico e elementos-traço, e de Paola Ramos Coutinho Reis, Lilian Lúcia Rocha e Silva, Jairo Tronto, Leônidas Paixão Passos e Júlio César José da Silva, sobre rejeitos da Samarco e espécies forrageiras, mostram como a formação em STEM pode ser orientada pela análise de questões ambientais concretas e de alta relevância regional.

O caráter interdisciplinar, característico das atividades de Extensão, surge de maneira expressiva no capítulo de Rafael Welerson Sott Meyer e Yipsy Roque Benito, no qual futuros engenheiros mecânicos participam do estudo e da produção de próteses. O projeto combina conhecimento em Engenharia Mecânica com um compromisso direto com a inclusão e a reabilitação, oferecendo aos estudantes uma experiência formativa que vai além

do domínio técnico estrito e exige diálogo com usuários, profissionais de saúde e demandas sociais específicas.

O capítulo de Daniele Dias Pereira e Marco Aurélio Kistemann Jr. discute o desenvolvimento de vídeos educacionais como recurso de prática formativa para professores, destacando a necessidade de preparar docentes em STEM que dominem não apenas os conteúdos, mas também linguagens e ferramentas contemporâneas de mediação pedagógica. Em interface direta com a educação básica, o trabalho de Matheus Six Madureira Guedes, Rafael Paiva Lôbo, Victor Baptista, Leonardo Souza e Paulo M. V. B. Barone apresenta um modelo de educação espacial prática para o Ensino Médio público, com desenvolvimento e lançamento de picossatélite, exemplificando como a Universidade pode contribuir para a formação científica de jovens e para despertar vocações em STEM na rede pública.

No campo da Microeletrônica e da Instrumentação, o capítulo de Luís Karlos Mendes de Oliveira, Estêvão Coelho Teixeira e Filipe Vinci dos Santos trata do desenvolvimento de uma matriz de sensores de pixels ativos usando o PDK Sky130 e ferramentas de código aberto, inserindo estudantes em um contexto de grande relevância tecnológica, fundamental para a formação acadêmica, em face do domínio de ferramentas de referência para o desempenho profissional futuro. Por fim, o texto de Marco Aurélio da Cunha Alves e Daniel de Almeida Fernandes, dedicado a estudos teórico e prático dos processos transitórios de carga e descarga de um tanque de gás comprimido, evidencia o valor de atividades que articulam modelagem, experimentação e análise de sistemas com aplicações diretas na Engenharia e na indústria.

Tomados em conjunto, esses capítulos mostram que a participação de estudantes em projetos de iniciação científica, tecnológica, de formação docente e de extensão contribui para individualizar percursos formativos, permitindo que cada estudante vivencie experiências de investigação, criação e aplicação que não seriam proporcionadas apenas pelos componentes curriculares clássicos. A capacidade de formular questões relevantes, construir e testar hipóteses, lidar com incertezas, trabalhar em equipe e comunicar resultados é desenvolvida em situações reais da prática acadêmica, configurando uma formação em STEM que integra conhecimentos, habilidades e atitudes de maneira consistente.

Do ponto de vista regional, os projetos apresentados neste volume evidenciam o papel da UFJF na produção de conhecimento orientado a problemas concretos de Juiz de Fora e de sua área de influência. Questões como

qualidade do ar, impactos de rejeitos de mineração, acessibilidade por meio de tecnologias assistivas, inclusão digital, fortalecimento da educação científica na escola pública e formação de recursos humanos em áreas estratégicas, como Microeletrônica e Engenharia de Estruturas, são enfrentadas aqui com base em investigação sistemática e fundamentação científica. A Universidade se afirma, assim, como agente de desenvolvimento regional, contribuindo com diagnósticos, métodos, tecnologias e formação de estudantes que atuam no próprio território.

Este volume se apresenta, portanto, como registro qualificado da produção em STEM na UFJF e, ao mesmo tempo, como registro da capacidade da Educação Superior pública de articular formação, produção de conhecimento e compromisso com o desenvolvimento regional e nacional. Ao tornar visíveis as experiências reunidas nestes 14 capítulos, reforça a ideia de que investir em formação em STEM - em suas múltiplas dimensões acadêmicas e sociais - é investir no futuro científico, tecnológico, social e econômico do país.

Prof. Dr. Paulo Barone
Depto. de Física - UFJF

Apresentação

Neste segundo volume do e-book “PESQUISAS NO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS, ENGENHARIAS E ARQUITETURA – UFJF” reafirma-se a importância da pesquisa científica como agente propulsor do desenvolvimento da sociedade, impulsionando inovações, aprimorando processos e contribuindo para a solução de desafios contemporâneos. No âmbito das Ciências Exatas, Engenharia e Arquitetura, esse impacto se torna ainda mais evidente, dado o caráter aplicado dessas áreas e sua relação direta com o progresso tecnológico e material.

É mister enfatizar que a geração de conhecimento de ponta nas universidades públicas brasileiras encontra um imperativo paralelo e igualmente crucial, qual seja, a sua divulgação científica eficaz e democrática. Esta não se resume a um mero relato de resultados, mas constitui um processo ativo de democratização do saber, de prestação de contas à sociedade e de formação de uma cultura que valoriza a razão, a evidência e a inovação.

Este segundo volume é resultado das investigações de pesquisadores jovens com pesquisadores experientes da Universidade Federal de Juiz de Fora no âmbito das Ciências Exatas. Cada capítulo representa não apenas um recorte de um tema específico, mas também a materialização do empenho e da dedicação de seus autores na geração de conhecimento e soluções inovadoras. Por meio de abordagens interdisciplinares, os capítulos revelam a importância da interação entre diferentes domínios do saber, refletindo a natureza complexa dos desafios enfrentados no mundo globalizado. As pesquisas apresentadas não apenas ilustram o potencial acadêmico e científico da UFJF, mas também reforçam a relevância do conhecimento produzido dentro das universidades públicas para a sociedade em geral.

Neste contexto, a divulgação científica emerge como um pilar estratégico, em um cenário marcado pela rápida disseminação de desinformação e pela necessidade de decisões baseadas em evidências e em metodologias de pesquisa consolidadas, reafirmando o papel das instituições públicas de ensino, pesquisa e extensão, ao buscar comunicar seus métodos e descobertas de forma acessível, de modo a combater o obscurantismo, fortalecendo o pensamento crítico da população, sua cidadania e a justiça

social. A divulgação científica responsável e ética, portanto, é o elo que pode conectar a excelência das pesquisas produzidas nas instituições públicas como a UFJF às urgentes demandas sociais no Brasil.

Que este segundo volume, tal qual o primeiro volume, publicado anteriormente pela Editora Akademy, contribua para novos estudos, servindo de inspiração para futuras gerações de pesquisadores e como um testemunho da capacidade transformadora da ciência e da tecnologia. Que este e-book também simbolize o compromisso da universidade pública brasileira com a partilha social do saber.

A produção e a disseminação do conhecimento científico constituem pilares fundamentais do desenvolvimento social, econômico e cultural de uma nação. Em um cenário global marcado por rápidas transformações e desafios complexos, a ciência se apresenta não apenas como um farol para a compreensão do mundo, mas como uma ferramenta essencial para a construção de soluções inovadoras e sustentáveis. Nesse contexto, as universidades públicas desempenham um papel ímpar, sendo os principais espaços de geração de saber de fronteira, formação de mentes críticas e promoção do diálogo entre a academia e a sociedade.

Assim, é com imensa satisfação que apresentamos o segundo volume de “Pesquisas no Instituto de Ciências Exatas, Engenharias e Arquitetura – UFJF”. Esta obra coletiva é um testemunho eloquente do vigor e da excelência da pesquisa desenvolvida na Universidade Federal de Juiz de Fora, materializando o compromisso de nossa instituição com a qualidade acadêmica e a relevância social. Os capítulos aqui reunidos transcendem os muros universitários, demonstrando como a investigação rigorosa e criativa pode responder a questões concretas, desde problemas ambientais locais até avanços tecnológicos de ponta.

A diversidade temática presente neste volume é um de seus maiores atributos. Ela reflete a abrangência e a interdisciplinaridade que caracterizam a UFJF. O leitor encontrará, nas páginas a seguir, um espectro rico de investigações: desde a transformação de resíduos eletrônicos em ferramentas para inclusão digital e educação, passando por reflexões filosóficas sobre a natureza da ciência, estudos sobre conservação de patrimônio cultural, desenvolvimento de lasers de altíssima precisão e sensores interferométricos, até pesquisas aplicadas ao controle de vibrações em estruturas e à análise da qualidade do ar que respiramos.

Esta coletânea evidencia que a pesquisa nas Engenharias, Ciências Exatas e Arquitetura é, por essência, um empreendimento plural. Ela conecta a abstração matemática e os princípios físicos fundamentais à modelagem computacional, ao desenvolvimento de novos materiais e à concepção de tecnologias sociais.

A divulgação científica, propósito central desta publicação, é etapa indispensável no ciclo da pesquisa. É o mecanismo pelo qual o conhecimento deixa de ser um patrimônio restrito a especialistas e se torna um bem comum, acessível a outros pesquisadores, estudantes, gestores públicos e à sociedade em geral. Ao compartilhar metodologias, resultados e discussões de forma clara e organizada, este e-book cumpre uma dupla função: (i) valida e consolida o trabalho realizado, submetendo-o ao escrutínio da comunidade acadêmica, e, simultaneamente, (ii) apresenta novas questões, inspira futuras investigações e fomenta a cultura científica.

Os trabalhos aqui descritos são frutos do esforço dedicado de discentes de graduação e pós-graduação, técnicos e docentes-pesquisadores, muitas vezes realizados em parceria com instituições públicas e privadas. Cada capítulo é uma janela para um universo de possibilidades, demonstrando que investir em ciência é investir no futuro. Convidamos, portanto, estudantes, colegas pesquisadores, profissionais e todos os interessados no progresso da ciência e da tecnologia a explorar este segundo volume. Que a leitura destas pesquisas não apenas informe, mas também motive e demonstre o poder transformador do conhecimento quando aliado à criatividade e ao compromisso com o bem público.

Agradecemos profundamente a todos os autores, revisores e parceiros que tornaram esta publicação possível. Sigamos, juntos, fortalecendo a pesquisa e a divulgação científica como alicerces para uma sociedade mais justa, inovadora e sustentável.

Convidamos todos os interessados em pesquisas científicas de alto nível, a explorar as páginas a seguir e refletir sobre o papel do conhecimento na construção de um futuro mais inovador, sustentável e democrático. É, sobretudo, uma celebração do ciclo virtuoso que une pesquisa robusta e divulgação comprometida, alicerce indispensável para uma sociedade mais justa, desenvolvida e consciente de seu destino.

Marco Kistemann, Bárbara Almeida e Eder Kapisch
Organizadores

1- TV Box descaracterizadas para educação: jogos cognitivos e programação como ferramentas de inclusão digital

Danilo Pereira Pinto¹
Eder Barboza Kapisch²
Exuperry Barros Costa³
Júlia Amélia da Silva Paiva⁴

Palavras iniciais

O presente capítulo apresenta a continuidade e ampliação de um projeto de extensão desenvolvido pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), em parceria com a Receita Federal do Brasil (RFB), cujo objetivo é a destinação sustentável de aparelhos de TV Box apreendidos no combate à pirataria. Tradicionalmente inutilizados, esses dispositivos foram descaracterizados e transformados em minicomputadores de baixo custo, sendo posteriormente destinados a escolas públicas da região, promovendo inclusão digital e reduzindo impactos ambientais associados ao descarte de lixo eletrônico. Nesta nova etapa, além da utilização dos equipamentos para atividades básicas de informatização escolar, foram investigadas aplicações tecnológicas voltadas ao apoio pedagógico. Destacam-se a instalação do jogo educativo *GBrainy*, que estimula habilidades cognitivas como memória, raciocínio lógico e matemático, e do Arduino IDE, possibilitando a programação de placas de prototipagem em

¹ Doutor em Ciências - Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Faculdade de Engenharia (UFJF) Departamento de Energia, E-mail: danilo.pinto@ufjf.br Orcid: 0009-0003-9141-2923

² Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Departamento de Circuitos Elétricos, Faculdade de Engenharia (UFJF), E-mail: eder.kapisch@ufjf.br, Orcid: 0000-0001-7609-7943.

³ Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia (UFJF), E-mail: exuperry.costa@ufjf.br, Orcid: 0009-0001-0656-4427.

⁴ Discente do curso Engenharia Elétrica – Robótica e Automação Industrial pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Faculdade de Engenharia (UFJF), E-mail: julia.paiva@estudante.ufjf.br, Orcid: 0009-0000-0916-478X.

atividades voltadas ao ensino médio. Essas iniciativas ampliam o potencial dos minicomputadores, favorecendo práticas pedagógicas inovadoras, contribuindo para o desenvolvimento de competências em lógica, programação e resolução de problemas. O projeto alia sustentabilidade, combate ao uso indevido da tecnologia e promoção da inclusão digital, ao mesmo tempo em que fortalece a formação técnica e cidadã dos estudantes de Engenharia Elétrica envolvidos. Dessa forma, evidencia-se o impacto social, educacional e ambiental da integração entre universidade, sociedade e órgãos públicos.

Introdução

O avanço contínuo da demanda por tecnologias digitais tem intensificado de maneira expressiva a geração de resíduos eletrônicos, configurando-se como um dos grandes desafios ambientais da atualidade especialmente em países emergentes como o Brasil (Quinto, 2025; Vargas, 2024). Esse problema é agravado pelo descarte inadequado desses equipamentos, cujos componentes contêm substâncias tóxicas capazes de contaminar o solo e a água, além de comprometer a saúde humana e o equilíbrio dos ecossistemas.

Entre os equipamentos que contribuem para o aumento do lixo eletrônico estão as TV Boxes, frequentemente introduzidas no país por meio de importações irregulares e utilizadas para acesso não autorizado a serviços de televisão por assinatura (Anatel, 2025). Além das questões legais, esses dispositivos possuem um ciclo de vida curto, tornando-se obsoletos rapidamente. Como resultado, muitas unidades são descartadas de maneira inadequada, ampliando o impacto ambiental do acúmulo de resíduos eletrônicos. Esse cenário evidencia a necessidade de estratégias inovadoras para o reaproveitamento sustentável desses aparelhos, transformando um problema ambiental em uma oportunidade educativa e social.

Além disso, observa-se uma carência significativa de infraestrutura tecnológica em diversas escolas públicas brasileiras (Anatel, 2023). Diversas instituições ainda não dispõem de computadores para uso livre dos discentes e uma parcela deles, especialmente aqueles residentes em áreas rurais, não possui acesso à internet, o que limita a incorporação plena de ferramentas digitais nos processos de ensino e aprendizagem. Essas ferramentas são fundamentais para ampliar o acesso à informação, promover práticas pedagógicas inovadoras e reduzir desigualdades educacionais, sobretudo em contextos de vulnerabilidade social.

Nos últimos anos, universidades públicas e institutos federais brasileiros vêm estreitando laços com a Receita Federal por meio do Programa Receita Cidadã (Receita Federal do Brasil, 2022). O acordo prevê, entre outras metas, o reaproveitamento, a descaracterização e a destinação socioambiental de bens apreendidos, transformando-os em recursos didáticos para ensino, pesquisa e extensão. Diante desse cenário, a UFJF, desde 2023, vem desenvolvendo pesquisas em parceria com a Receita Federal do Brasil (RFB) com o objetivo de integrar a destinação sustentável de equipamentos apreendidos ao reaproveitamento com fins educacionais (Receita Federal do Brasil, 2025). Trabalhos como Quevedo (2024) demonstram que o processo de descaracterização desses dispositivos é tecnicamente viável e eficaz. Esse procedimento consiste na substituição do sistema original por sistemas operacionais de código aberto, como distribuições baseadas em Linux. Tal prática tem possibilitado a transformação de aparelhos, antes utilizados de forma ilegal, em ferramentas úteis para a promoção da inclusão digital. Além disso, pesquisas recentes ressaltam o impacto positivo do uso dessas soluções na ampliação do acesso a recursos tecnológicos no ambiente escolar. A implementação de aplicações educacionais confirma que é possível reaproveitar esses dispositivos com fins pedagógicos, obtendo resultados expressivos (de Souza, 2024).

Considerando a semelhança estrutural entre as TV Boxes e computadores convencionais, ainda que com capacidade de processamento limitada, investigou-se a viabilidade de adaptá-las para funcionar como minicomputadores. Para tanto, realizou-se a descaracterização dos dispositivos, substituindo o sistema operacional original baseado em Android pelo sistema livre Armbian⁵, que fornece uma interface gráfica similar à de sistemas operacionais amplamente utilizados em ambientes pedagógicos (Armbian, 2025). A primeira etapa do projeto que a UFJF realizou foi publicada nos trabalhos Pinto (2024a) e Pinto (2024b).

Dando sequência na pesquisa educacional, o projeto evoluiu e passou a explorar aplicações educacionais inovadoras desses minicomputadores, expandindo o propósito original. Após a reconfiguração, foram realizados testes com o objetivo de avaliar a viabilidade de instalação e execução de softwares educacionais em ambiente escolar. Como resultado, foi possível implementar com sucesso o jogo *Gbrainy*⁶, que promove o desenvolvimento de

⁵ <https://www.armbian.com/>

⁶ [https://wiki.gnome.org/Apps\(2f\)gbrainy.html](https://wiki.gnome.org/Apps(2f)gbrainy.html)

habilidades cognitivas, como lógica, raciocínio matemático e memória, por meio de desafios interativos de fácil compreensão (Gnome, 2025). Em seguida, analisou-se a viabilidade de uma nova implementação voltada ao uso dos kits de robótica recebidos pelas escolas públicas. Dessa forma, foi possível instalar e utilizar o Arduino IDE⁷, cuja principal função é desenvolver códigos para a criação de projetos com placas físicas de Arduino, recurso fundamental para a elaboração de projetos educativos simples de programação (Arduino, 2025).

Vale destacar que diversas meta-análises recentes demonstram que metodologias de ensino baseadas em jogos digitais e gamificação resultam em efeitos médios a grandes no aprendizado, motivação e desenvolvimento cognitivo dos estudantes (Heddachi, 2025). Além disso, o uso da plataforma Arduino no contexto escolar tem sido amplamente reconhecido por sua capacidade de promover pensamento algorítmico, abstração e decomposição de problemas, pilares do pensamento computacional e da construção do conhecimento, conforme o construcionismo de Papert (García-Tudela, 2023; Massa, 2022).

Dessa forma, o presente trabalho apresenta uma alternativa sustentável e educativa para o destino desses dispositivos, promovendo sua reconfiguração e ampliando o acesso à tecnologia em escolas públicas. Com esses recursos, as TV Box poderão ser utilizadas para promover atividades lúdicas que estimulam memória, atenção, raciocínio lógico e resolução de problemas, além de introduzir estudantes do ensino médio à lógica de programação e prototipagem eletrônica, habilidades fundamentais para a educação e pensamento computacional.

O projeto em questão assume papel estratégico ao transformar aparelhos de TV Box apreendidos em minicomputadores, promovendo sua descaracterização e reutilização em escolas públicas. Essa iniciativa exemplifica uma abordagem prática de economia circular e sustentabilidade tecnológica: ao evitar o descarte imediato de dispositivos eletrônicos, dá-se nova vida a equipamentos que, de outra forma, se tornariam lixo tóxico, reduzindo impactos ambientais e fomentando a inclusão digital (Neto, 2023; Paes, 2017). Isso possibilita que escolas desempenhem um papel crucial na formação de cidadãos conscientes e responsáveis. Ao integrar práticas sustentáveis na gestão escolar, como o uso de tecnologia reaproveitada, fortalece-se uma cultura de cuidado ambiental desde a educação básica,

⁷ <https://www.arduino.cc/en/software/>

estimulando nos estudantes valores de responsabilidade, consumo consciente e inovação com propósito social. Assim, o projeto transcende o aspecto técnico e se torna um instrumento de educação voltada à preservação e ao uso ético dos recursos (Chagas, 2025).

Os objetivos do trabalho desenvolvido se apoiaram nos seguintes pontos:

- Promover o reaproveitamento responsável de dispositivos apreendidos pela RFB, transformando TV Box em minicomputadores para uso pedagógico, contribuindo para a redução do lixo eletrônico e seus impactos ambientais.
- Fomentar a inclusão digital em escolas públicas, ampliando o acesso de alunos a ferramentas tecnológicas e recursos educacionais interativos, independentemente de sua localidade ou condição socioeconômica.
- Integrar práticas de pedagogia ativa e aprendizagem baseada em jogos e programação, estimulando habilidades cognitivas, raciocínio lógico, criatividade e pensamento crítico nos estudantes.
- Desenvolver competências técnicas nos alunos e professores, permitindo a familiarização com hardware, software livre e programação, de forma a fortalecer a cultura de inovação e autonomia tecnológica.
- Potencializar a replicabilidade da iniciativa em outros contextos educativos, demonstrando como a colaboração entre universidade, gestão pública e escolas pode gerar impacto social, ambiental e pedagógico.

Ao integrar essas dimensões, sustentabilidade, inclusão digital, pedagogia ativa e formação técnica, o projeto não só reforça a relevância social e educativa da ação extensionista, como também ressalta seu potencial replicável em contextos semelhantes. Este capítulo, portanto, apresenta de forma articulada essa trajetória: desde a destinação sustentável das TV Box até sua transformação em ferramentas educacionais dinâmicas, oferecendo um panorama coerente do impacto ambiental, social e pedagógico gerado pela convergência entre universidade, gestão pública e escolas.

As próximas seções detalham a metodologia de descaracterização das TV Box, a implementação dos minicomputadores em escolas públicas, a

aplicação de softwares educacionais e os principais resultados obtidos a partir das ações desenvolvidas.

Metodologia adotada

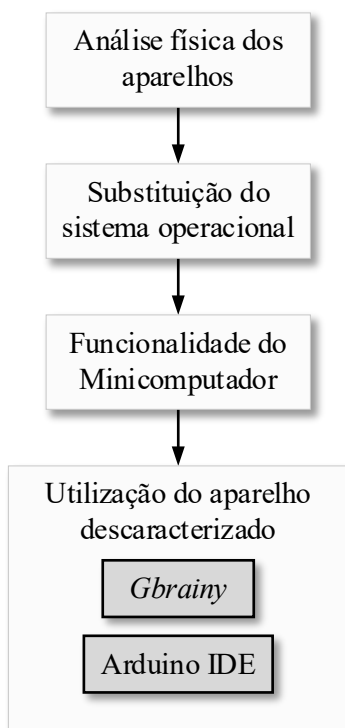
O trabalho desta etapa de pesquisa permeou por um estudo técnico sobre a descaracterização do modelo Tx9, um dos dispositivos mais comuns entre os equipamentos apreendidos, mas ainda pouco explorado. Diferentemente de trabalhos presentes na literatura, optou-se pela utilização do software *Balena Etcher*⁸ para a gravação das imagens no cartão microSD, devido à sua simplicidade e ao conhecimento prévio da equipe. Nesta seção, é descrita a metodologia para a realização do projeto de descaracterização dos TV Box, iniciando-se com a descrição das características e recursos dos dispositivos, seguida das etapas metodológicas para a execução do projeto e da execução dessas etapas. Serão discutidas a instalação, execução e usabilidade do *GBrainy*, uma ferramenta de código aberto voltada ao desenvolvimento de habilidades cognitivas por meio de jogos, nos dispositivos reconfigurados. Também será explorada a implementação do Arduino IDE, software utilizado para escrever, compilar e carregar códigos em placas de Arduino, possibilitando a criação e execução de protótipos eletrônicos interativos.

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se em uma abordagem prática e experimental, realizada no contexto de um projeto de extensão. O objetivo principal do projeto foi investigar o processo de descaracterização de TV Boxes apreendidas pela RBF e analisar a viabilidade de sua reconfiguração para fins de inclusão digital em escolas públicas. Diversos modelos desses dispositivos, incluindo as versões TX9, MXQPRO e H6+, foram recebidos e submetidos a procedimentos iniciais de análise física e substituição do sistema operacional. No entanto, apenas o modelo TX9 foi utilizado para avaliar a viabilidade de ferramentas educacionais, como o *GBrainy*, e de um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), em contexto escolar. Dessa forma, o TX9 constituiu o foco principal das discussões apresentadas neste capítulo. Todas as atividades tiveram como propósito examinar a possibilidade de adaptar tecnicamente esses dispositivos por meio de novos sistemas operacionais, com o intuito de facilitar o acesso à tecnologia em locais com infraestrutura limitada. A Figura 1 apresenta um fluxograma com as principais etapas realizadas

⁸ <https://etcher.balena.io/>

durante o projeto mencionado neste capítulo. A seguir, são descritos mais detalhes de cada etapa.

Figura 1: Fluxograma representativo das etapas metodológicas para execução do projeto.



Fonte: Própria autoria.

Análise física

O modelo de TV Box utilizado para o desenvolvimento da descaracterização e das novas implementações é o TX9 e está apresentado na Figura 2. Este modelo específico é amplamente comercializado de forma irregular, principalmente devido ao seu baixo custo de mercado.

Figura 2: Imagem da TV Box modelo TX9.



Fonte: Própria autoria.

Como primeira etapa do processo, realizou-se a abertura física de uma das unidades, com o objetivo de identificar as especificações técnicas do processador e outras configurações e conexões existentes na placa lógica do dispositivo. Durante essa análise, verificou-se que o aparelho utilizava o processador *Rockchip RK3228A*, mostrado na Figura 3, cujas informações detalhadas encontram-se na Tabela 1. Este processador é comumente encontrado em equipamentos TV Box de baixo custo e com suporte técnico limitado. É importante observar que, mesmo que os aparelhos possuam o mesmo nome de modelo, é possível que as características internas, como componentes e chips possam ter algumas diferenças, devido à fabricação em períodos diferentes.

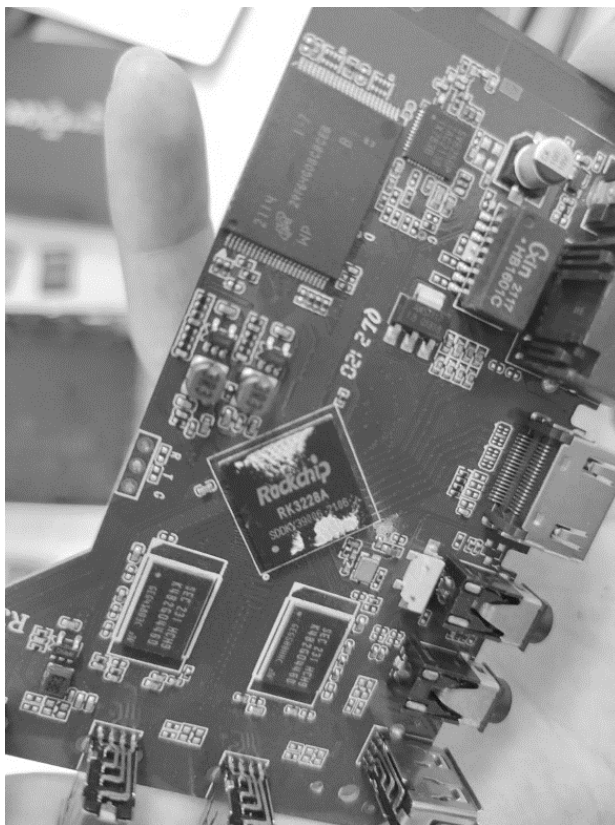
Substituição do Sistema Operacional

O processo teve início com a instalação do software *Balena Etcher* em um computador pessoal, cuja tela inicial da aplicação pode ser observada na Figura 4. Esse software é utilizado para gravar a imagem do utilitário *Multitool* em um cartão microSD, ferramenta que é utilizada para facilitar a gravação da imagem do sistema operacional escolhido posteriormente, uma vez que cria

automaticamente as partições necessárias para que o aparelho seja reconfigurado e inicialize diretamente no novo sistema.

Após a gravação da imagem no cartão microSD, deu-se prosseguimento à seleção do sistema operacional a ser utilizado. Considerando que o dispositivo utiliza memória do tipo NAND, optou-se por uma versão *legacy* da distribuição Armbian. Essa escolha é justificada pelo fato de que as versões *legacy* são desenvolvidas com kernels mais antigos e oferecem suporte a drivers estáveis, garantindo maior compatibilidade com dispositivos que possuem hardware limitado ou interfaces de memória com suporte restrito, como é o caso específico das TV Boxes analisadas. A imagem previamente selecionada foi então copiada para a pasta de imagens presente no cartão microSD, viabilizando sua instalação posterior no dispositivo.

Figura 3: Fotografia mostrando a placa lógica e a estrutura interna da TV Box modelo TX9.



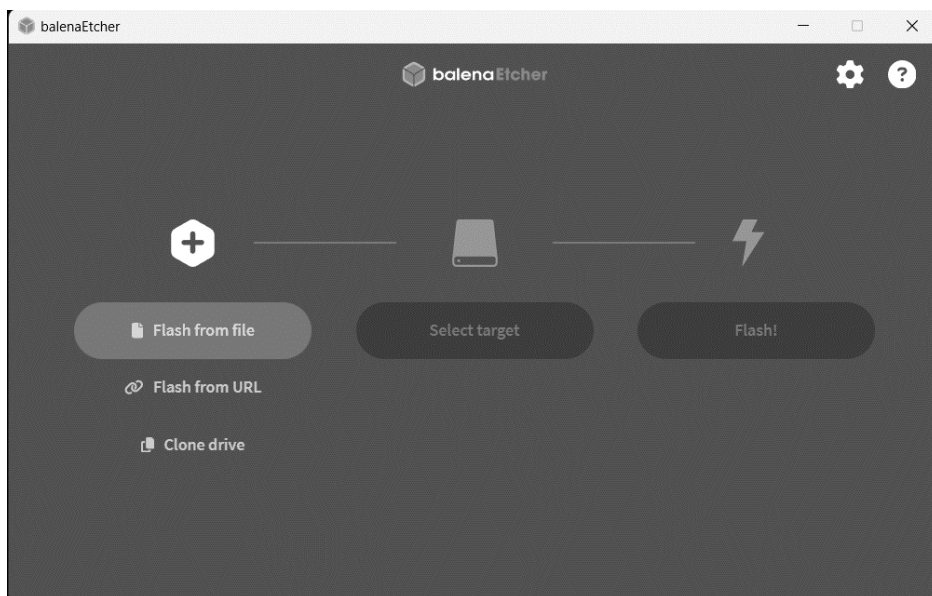
Fonte: Própria autoria.

Tabela 1: Algumas especificações da TV Box TX9 com processador Rockchip RK3228A.

Item	Especificação detalhada
Arquitetura (ISA)	ARMv7-A (32 bits), Cortex-A7
Núcleos	Quad-core (4 núcleos, 4 threads)
Frequência máxima	Até 1,2 GHz por núcleo
Cache	256 KB
Processo de fabricação	28 nm HKMG
Consumo (TDP)	Aproximadamente 5 W (baixo consumo)
Memória compatível	Até 2 GB; DDR3-1866 ou LPDDR3-1333
GPU integrada	ARM Mali-400 MP2
Clock da GPU	600 MHz
Desempenho GPU (FP32)	Aproximadamente 10,8 GFLOPS

Fonte: Rockchip (2019).

Figura 4: Tela inicial do *Balena Etcher*.



Fonte: Própria autoria.

Em seguida, o cartão foi reinserido no computador, permitindo o acesso à partição de arquivos do *Multitool*. Esse procedimento possibilitou a criação de um ambiente de inicialização personalizado, assegurando a substituição

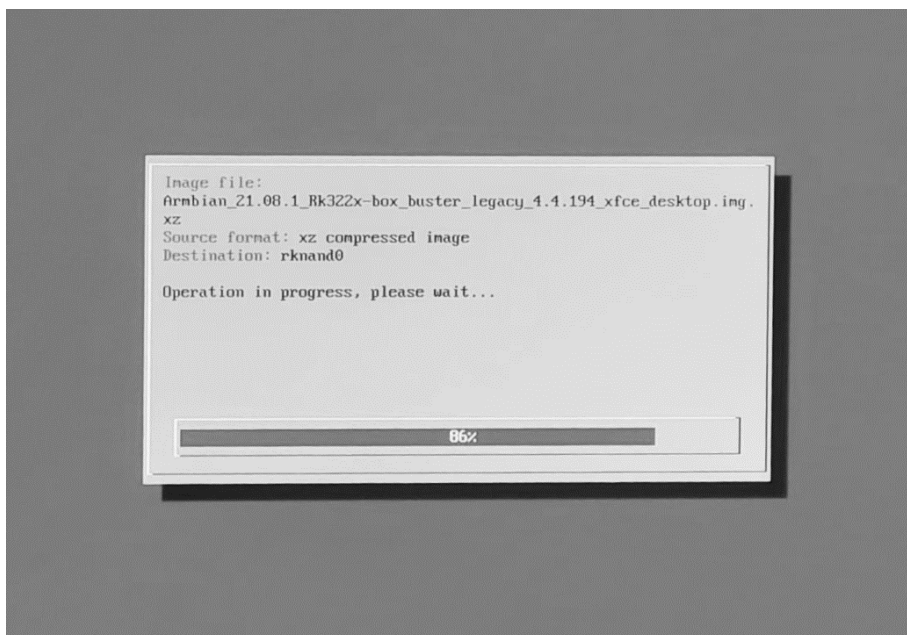
segura do sistema original baseado em Android e viabilizando o uso eficiente do Armbian nos dispositivos reaproveitados.

Ao reinicializar a TV Box com o cartão microSD inserido, o menu da ferramenta *Multitool* é carregado automaticamente, permitindo a seleção da opção *Burn Image to Flash*. Essa funcionalidade realiza a gravação da nova imagem diretamente na memória interna do dispositivo. O processo de instalação é mostrado na Figura 5. Já na Figura 6, é apresentada a conclusão desse processo com a tela inicial do Armbian.

Funcionalidade do Minicomputador

Após a descaracterização, os dispositivos passam a funcionar como minicomputadores, apresentando limitações principalmente relacionadas à memória RAM, geralmente de 2 GB. Apesar dessas restrições, os aparelhos demonstraram desempenho satisfatório para atividades educacionais básicas, que constituem o foco deste projeto.

Figura 5: Processo de instalação da imagem no TV Box.



Fonte: Própria autoria.

Figura 6: Conclusão do processo de instalação mostrando a tela inicial do Armbian.



Fonte: Própria autoria.

O sistema operacional instalado foi configurado para incluir aplicações essenciais, como o navegador *Mozilla Firefox*⁹ e a suíte *LibreOffice*¹⁰. Essa configuração possibilita o acesso à internet, a elaboração de textos e a realização de pesquisas escolares. A interface gráfica é intuitiva, oferecendo uma experiência de uso acessível mesmo para usuários com pouca familiaridade tecnológica. Dessa forma, os dispositivos tornam-se ferramentas eficazes para apoiar a informatização das escolas, especialmente em ambientes com infraestrutura tecnológica limitada.

Utilização do aparelho descaracterizado

Com o objetivo de maximizar o aproveitamento pedagógico dos dispositivos reconfigurados como minicomputadores, foi conduzida uma investigação sobre sua utilização como ferramentas de apoio ao ensino de disciplinas como Matemática, Língua Portuguesa e, em níveis mais avançados, Programação. Nesse contexto, foram realizados testes iniciais voltados à instalação de softwares educacionais, focando em ambientes adequados para alunos de diferentes níveis de formação.

⁹ <https://www.firefox.com/pt-BR>

¹⁰ <https://www.libreoffice.org/>

Inicialmente, tentou-se instalar o aplicativo educacional *GCompris* por meio do terminal. No entanto, o processo de instalação mostrou-se muito lento, mesmo utilizando conexão de internet cabeada, e ao final o aplicativo apresentava uma interface comprometida, exibindo apenas uma tela branca que impossibilitava o acesso às funcionalidades interativas e opções essenciais para seu uso adequado. Esse problema estava relacionado à ausência de drivers gráficos compatíveis com a arquitetura do sistema operacional empregado. Dessa forma, essa aplicação foi inviabilizada e descartada, e foram iniciadas algumas pesquisas para implementar outra ferramenta com uma função parecida.

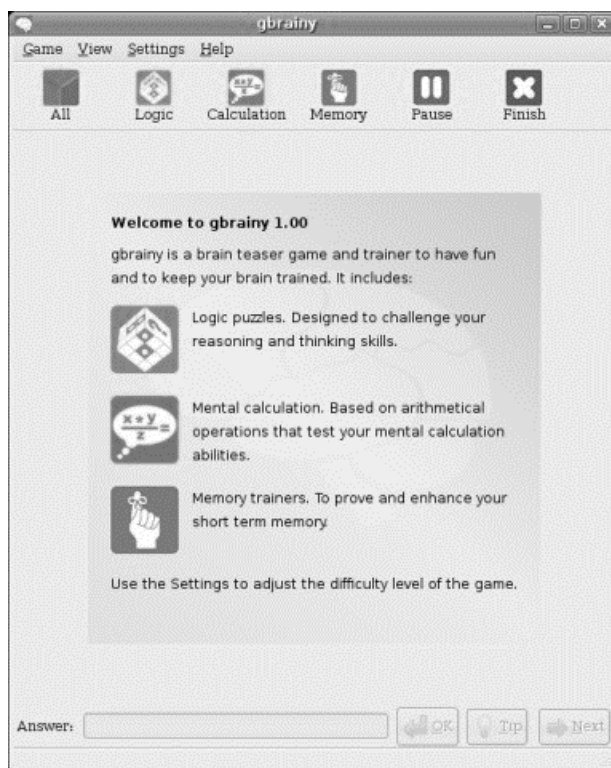
Diante dessa limitação, após estudos e pesquisas, optou-se pela instalação do *GBrainy*, uma ferramenta educacional em forma de jogo educativo, mais leve e com menor consumo de memória RAM. A instalação foi significativamente mais rápida, e o desempenho da aplicação mostrou-se satisfatório, sendo de fácil uso e entendimento. No entanto, a interface do aplicativo encontrava-se totalmente em inglês, conforme ilustrado na Figura 7 o que poderia dificultar seu uso por parte de estudantes de níveis iniciais e comprometer sua aplicação. Para solucionar essa barreira, foi feita a instalação de um pacote de idioma em português e a criação de um atalho configurado para inicializar o programa diretamente no idioma selecionado, tudo realizado por meio do terminal.

Foram realizados testes de funcionalidade da aplicação com alunos selecionados da equipe do projeto. Observou-se que o jogo apresentou desempenho estável, além de possuir uma interface simples e intuitiva, permitindo a inserção de respostas e a navegação entre os desafios propostos. De acordo com o retorno dos participantes, o recurso seria mais adequado para discentes do sexto ao nono ano, considerando que as perguntas exigem um nível mais avançado de conhecimento.

Após a implementação bem-sucedida do *GBrainy*, deu-se início à segunda etapa da pesquisa, que consistia na instalação do ambiente Arduino IDE, com o objetivo de permitir a realização de atividades introdutórias em programação e robótica, focadas em práticas com alunos do ensino médio.

Para a instalação, foi necessário utilizar a versão Arduino IDE ARM64, por se tratar de um aparelho com esse tipo de arquitetura, conforme mencionado anteriormente. A instalação também foi realizada via terminal, incluindo a resolução das dependências necessárias. Concluído esse processo, foi preciso adicionar o usuário ao grupo *dialout*, responsável por conceder permissões de

Figura 7: Tela inicial em inglês *GBrainy*.

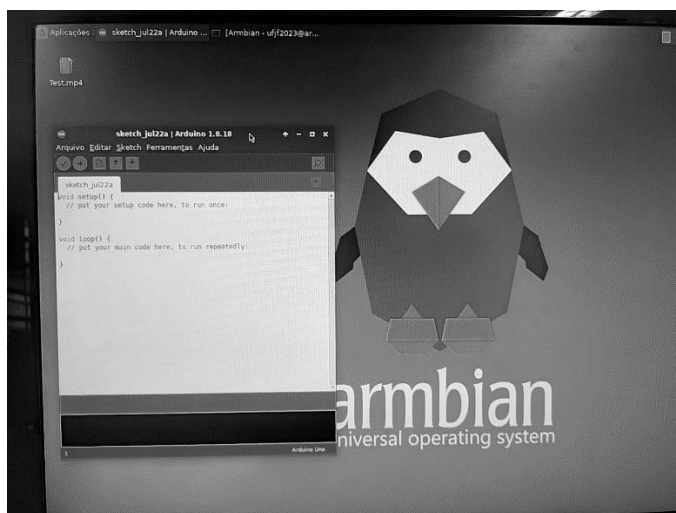


Fonte: Própria autoria.

acesso às portas seriais do sistema. Esse passo é essencial, uma vez que a IDE depende dessas portas para programar placas como Arduino Uno, Nano, Mega, entre outras. Caso o usuário não esteja incluído nesse grupo, não terá as permissões adequadas para acessar as interfaces USB/serial, o que pode resultar em erros durante o envio de códigos às placas, comprometendo a comunicação.

Após essa configuração, procedeu-se à criação de um atalho gráfico na interface do sistema, permitindo o acesso à IDE diretamente pela guia de aplicativos. Essa medida tem como objetivo facilitar o uso, eliminando a necessidade de execução via terminal e proporcionando maior agilidade na localização e no uso do ambiente de desenvolvimento. A Figura 8 mostra a interface do Arduino IDE instalada no Armbian e pronta para a programação.

Figura 8: Arduino IDE no Armbian instalado no TV Box TX9.



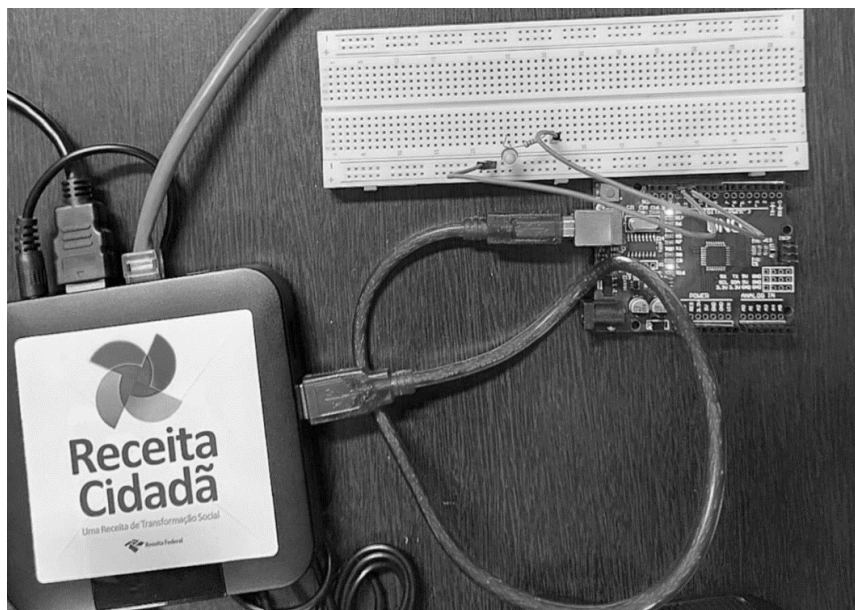
Fonte: Própria autoria.

Na etapa final do processo, foram conduzidos testes práticos com o objetivo de verificar a comunicação entre o sistema reconfigurado e o dispositivo de hardware externo. Para isso, foi compilado e executado um código simples de acionamento de um LED, cuja montagem pode ser vista na Figura 9. Apesar de a aplicação demonstrada aqui ser bastante simples, ela evidencia que aplicações mais complexas também podem ser realizadas e implementadas de forma semelhante no hardware.

A resposta foi satisfatória, demonstrando o funcionamento adequado da interface serial e a viabilidade do ambiente como plataforma de apoio à introdução à programação. A Figura 10 ilustra a tela com o código compilado durante os testes.

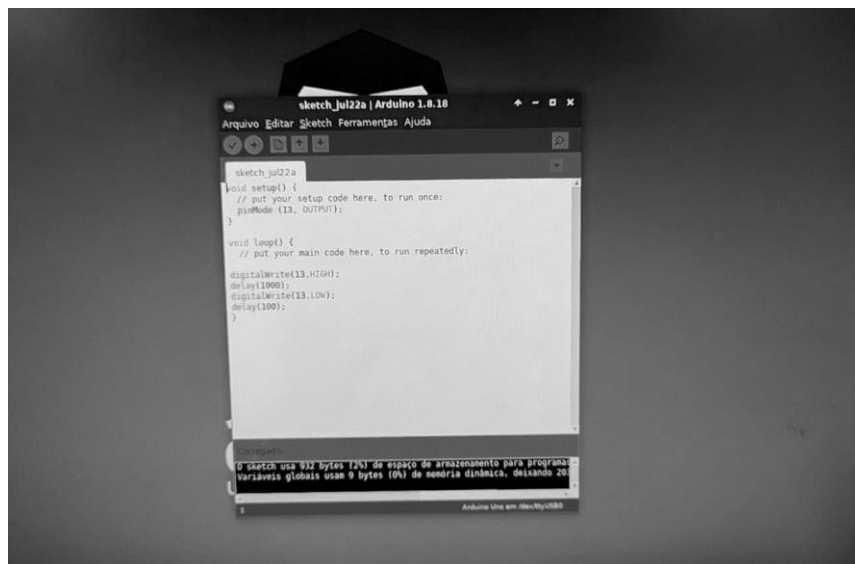
Apesar dos resultados satisfatórios, uma limitação identificada durante os testes foi a quantidade reduzida de portas USB disponíveis no dispositivo TX9, que conta com apenas duas entradas. Essa restrição implica na necessidade de desconectar periféricos essenciais, como mouse ou teclado, sempre que se desejava compilar um código utilizando o Arduino IDE. Para contornar essa limitação, foi empregado um *hub* USB, que atua como extensor, permitindo a conexão simultânea de múltiplos dispositivos.

Figura 9: Protótipo de aplicação de programação via Arduino IDE.



Fonte: Própria autoria.

Figura 10: Código utilizado para demonstração da programação do Arduino.



Fonte: Própria autoria.

Resultados

A iniciativa teve início com o recebimento de aproximadamente 1.600 unidades de TV Boxes apreendidas pela RFB. A partir dessa ação e das etapas mencionadas anteriormente, deu-se início a um processo de descaracterização em massa, contando com a participação de discentes dos cursos de Engenharia Elétrica da UFJF. A aplicação desse projeto revelou-se de grande relevância social, especialmente para escolas públicas brasileiras que enfrentam limitações no acesso a recursos computacionais. A desigualdade no acesso à tecnologia é um problema que afeta diretamente a qualidade do ensino e a equidade de oportunidades educacionais.

Nesse cenário, a reconfiguração das TV Boxes e sua transformação em minicomputadores de uso educacional consolidou-se como uma solução inovadora, econômica e de alto impacto ecológico e social. Esses equipamentos possibilitam que muitos estudantes tenham contato com ferramentas digitais básicas, como editores de texto, navegadores web e ambientes operacionais de uso geral. Os resultados do uso das TV Boxes com as aplicações iniciais já foram validados, por meio das respostas positivas das secretarias de escolas públicas e entidades assistenciais da região, que receberam os aparelhos como doação. Além disso, a implementação do software educacional *GBrainy* agrega valor pedagógico ao projeto. Sua proposta lúdica, aliada à simplicidade de uso, auxilia na fixação de conteúdos básicos de forma divertida e engajadora, despertando o interesse dos estudantes e contribuindo para um aprendizado mais eficaz.

Adicionalmente, a integração da IDE do Arduino nos dispositivos reconfigurados apresenta-se como uma oportunidade para complementar os kits de robótica já distribuídos na maioria das escolas públicas ou como meio de introduzir alunos ao mundo da robótica e da programação. Essa combinação pode enriquecer as práticas de ensino de ciência e tecnologia, incentivando a experimentação e o pensamento computacional.

Considerações Finais

Neste capítulo, foi demonstrada a viabilidade técnica da descaracterização do modelo TX9, utilizando o *Balena Etcher* como ferramenta alternativa para a gravação do sistema operacional. A implementação do software educacional *GBrainy* e do Arduino IDE nos dispositivos reconfigurados evidencia o potencial desses equipamentos na promoção do

desenvolvimento cognitivo e no apoio ao processo de aprendizagem. O *GBrainy* apresenta uma interface simples e atrativa, além de conter níveis de dificuldade progressivos, o que permite sua aplicação em diferentes etapas da educação básica, desde o ensino fundamental até o ensino médio, reforçando a aprendizagem multidisciplinar do conteúdo escolar.

O Arduino IDE apresenta uma interface simples, permitindo que os estudantes explorem conceitos de programação e eletrônica de forma prática, desde que contem com o devido acompanhamento pedagógico. Por meio da experimentação e da construção de circuitos, essa ferramenta estimula o pensamento crítico e a resolução de problemas, contribuindo para o desenvolvimento de habilidades essenciais.

Os resultados obtidos reforçam a importância de iniciativas que combinam software livre e reaproveitamento tecnológico como estratégias sustentáveis e acessíveis para promover a inclusão digital.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se a expansão da pesquisa com outros modelos de TV Box, a integração de diferentes aplicações educacionais e a realização de estudos que avaliem o impacto pedagógico dessas tecnologias em contextos escolares reais. Como a instalação dos aplicativos foi concluída, torna-se possível realizar análises qualitativas e quantitativas de seu funcionamento em ambiente escolar, avaliando a absorção do conteúdo pelos alunos, o engajamento nas atividades e a efetividade das aulas mediadas por esse tipo de tecnologia.

Já existem planos futuros sendo discutidos, como a criação de turmas para um teste piloto a ser realizado nas escolas da região, visando analisar o impacto social positivo que esta pesquisa pode gerar.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Educação Tutorial PET Elétrica, ao Laboratório de Eficiência Energética (LEENER), à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), à Pró-Reitoria de Extensão (PROEX) da UFJF e à Receita Federal do Brasil (RFB).

Referências

- Anatel. (2023). **Em 2022, Brasil registrou 9,5 mil escolas sem acesso à internet.** Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/em-2022-brasil-registrou-9-5-mil-escolas-sem-acesso-a-internet>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- Anatel. (2025). **Anatel e PF desarticulam esquema milionário de “TV Box” e “Gatonet” em Operação PRAEDO.** Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/anatel-e-pf-desarticulam-esquema-milionario-de-tv-box-e-gatonet-em-operacao-praedo>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- Arduino. (2025). **Arduino IDE.** Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software/>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- Armbian. (2025). **Linux for ARM development boards.** Disponível em: <https://www.armbian.com/>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- Chagas, J. da C., Pereira, A. R. R., & de Lima Erazo, R. (2025). **Escolas Sustentáveis: integrando a Educação Ambiental e a Gestão Escolar.** *Revista JRG de Estudos Acadêmicos*, 8(18), e082063-e082063.
- de Souza, F. T., Lacerda, K. M., Mauricio, C. R. M., da Silva, R. B., Altarugio, G. S., & Hachisuca, A. M. M. (2024). **Análise de Desempenho de Aparelhos TV Box Descaracterizados para Uso Educacional.** In *Congresso Latino-Americano de Software Livre e Tecnologias Abertas (Latinoware)* (pp. 364-367). SBC.
- García-Tudela, P. A., & Marín-Marín, J. A. (2023). **Use of Arduino in Primary Education: a systematic review.** *Education Sciences*, 13(2), 134.
- GNOME. (2025). **gbrainy.** Disponível em: <https://wiki.gnome.org/Apps/gbrainy>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- Heddachi, Y. (2025). **Learning Through Play: How Science Validates Our Educational Approach.** Brainide. Disponível em: https://brainide.com/articles/learning-through-play-how-science-validates-our-educational-approach/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 28 ago. 2025.
- Massa, N. P., De Oliveira, G. S., & dos Santos, J. A. (2022). **O construcionismo de Seymour Papert e os computadores na educação.** *Cadernos da FUCAMP*, 21(52).
- Neto, G. C. D. O., Correia, A. D. J. C., Tucci, H. N. P., Melatto, R. A. P. B., & Amorim, M. (2023). **Reverse chain for electronic waste to promote circular economy in Brazil: a survey on electronics manufacturers and importers.** *Sustainability*, 15(5), 4135.
- Paes, C. E., Bernardo, M., da Silva Lima, R., & Leal, F. (2017). **Management of waste electrical and electronic equipment in Brazilian public education institutions: implementation through action research on a university campus.** *Systemic Practice and Action Research*, 30(4), 377-393.
- Pinto, D. P., Kapisch, E. B., & Silva, L. R. M. (2024a). **Tv Box: destinação sustentável**

de lixo eletrônico e combate ao consumo de pirataria – formação técnica e cidadã nos cursos de Engenharia Elétrica da UFJF. In: Pesquisas no Instituto de Ciências Exatas, Engenharias e Arquitetura – UFJF. Akademy Editora. Disponível em: <https://www.akademyeditora.com.br/assets/ebooks/akademy-ebook-pesquisainstitutociencias.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2025.

Pinto, D. P., Paiva, J. A. S., & Kapisch, E. B. (2024b). **TV Box: destinação sustentável de lixo eletrônico e combate ao consumo de pirataria.** In: 52º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE 2024 e VII Simpósio Internacional de Educação em Engenharia. Associação Brasileira de Educação em Engenharia – ABENGE e Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória/ES.

Quevedo, M., & Galante, G. (2024). **Transformando TV Boxes Apreendidas Pela Receita Federal em Computadores Educacionais.** In *Congresso Latino-Americano de Software Livre e Tecnologias Abertas (Latinoware)* (pp. 496-499). SBC.

Quinto, S., Law, N., Fletcher, C., Le, J., Antony Jose, S., & Menezes, P. L. (2025). **Exploring the E-Waste Crisis: Strategies for Sustainable Recycling and Circular Economy Integration.** *Recycling*, 10(2), 72.

Receita Federal do Brasil. (2022). **Receita Cidadã: Uma Receita de Transformação Social.** Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/cidadania-fiscal/novos-destinos>. Acesso em: 28 ago. 2025.

Receita Federal do Brasil. (2025). **Mil unidades de TV Box são transportadas de Natal/RN para Juiz de Fora/MG para serem transformadas em minicomputadores.** Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/noticias/2024/junho/mil-unidades-de-tv-box-sao-transportadas-de-natal-rn-para-juiz-de-foramg-para-serem-transformadas-em-minicomputadores>. Acesso em: 28 ago. 2025.

Rockchip Electronics Co., Ltd. (2019). **Especificações técnicas do chipset Rockchip RK3228A.** Disponível em: <https://p.globalsources.com/IMAGES/PDT/SPEC/470/K1174040470.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2025.

Vargas, D. B., Campos, L. M. D. S., & Luna, M. M. M. (2024). **Brazil's Formal E-Waste Recycling System: From Disposal to Reverse Manufacturing.** *Sustainability*, 16(1), 66.

2- Qual é a natureza da Ciência?

Guilherme de Berredo-Peixoto¹¹

Alice da Silva de Martin¹²

Introdução

Um dos temas mais abordados em Filosofia da Ciência diz respeito à própria definição de Ciência: quais são as características típicas de um discurso científico? Quais são os critérios demarcadores de um discurso científico? Importantes cientistas e filósofos da Ciência propuseram concepções diferentes sobre os critérios mais apropriados da demarcação do discurso científico. Podemos citar alguns deles, particularmente úteis para a nossa abordagem: Karl Popper, Pierre Duhem, Willard van Quine, Imre Lakatos e Thomas Kuhn.

A concepção de Karl Popper (1959, 1992) pode ser considerada uma das mais populares e a pioneira no esforço em compreender todo o empreendimento científico por meio de um elemento unificador. Segundo ele, o discurso científico se caracteriza pela possibilidade de refutação, ou seja, ele é, acima de tudo, um discurso *falseável*. A estrutura lógica que melhor resume sua filosofia é a seguinte:

Se p , então q . Dado q , então provavelmente p .

Essa estrutura não parece causar muito impacto, embora ela realmente seja impactante, porque é diferente da estrutura que está fixada no imaginário popular:

Se p , então q . Dado q , então p ,

que obviamente está errada. Se um princípio p implica a consequência observacional q , então é falacioso dizer que uma vez observada a consequência q , o princípio p deve ser dado como 100% certo. Um princípio fantasioso pode

¹¹ Professor da Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Física. E-mail: gbpeixoto@ufjf.br. Orcid 0000-0002-6920-9334.

¹² Estudante do 2º ano do Ensino Médio. Colégio Militar de Juiz de Fora. E-mail: demartinsilvaalice@gmail.com.

dar origem a uma consequência observacional correta, não há nada em lógica que impeça isso de acontecer.

Mas ocorre que o grau de complexidade das teorias científicas (especialmente as das ciências matemáticas) é tão elevado, que alguém poderia duvidar que esses esquemas lógicos simples pudessem ser aplicados às teorias reais sem prejuízo algum. E, de fato, houve pensadores importantes que duvidaram disso.

Este é apenas um resumo esquemático simplificado, ou seja, não queremos dizer aqui que, por exemplo, Karl Popper tenha sido o único que percebeu a importância daquela estrutura lógica. Cronologicamente, Pierre Duhem (1906, 1954) percebeu antes e ainda foi além. No âmbito das teorias físicas, Duhem teria dado uma boa resposta à concepção popperiana do discurso científico, dizendo que a falseabilidade de uma teoria é sempre ambígua na prática, ou seja, não se sabe que parte da teoria está sendo falseada. Willard van Quine (1951) assimilou essa visão de Duhem e a adaptou para todos os ramos do conhecimento humano, o que ficou conhecida como a *Tese de Duhem-Quine*.

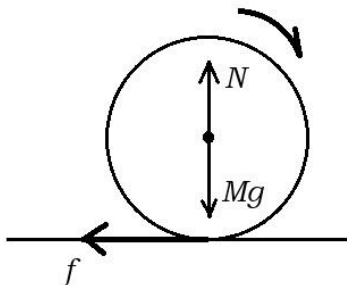
A tese de Duhem-Quine pode ser vista como a fundamentação do cenário de Imre Lakatos (1978), em que um *programa de pesquisa* (termo usado como a instanciação de uma grande teoria científica no plano social) consiste numa rede de hipóteses auxiliares das quais uma função é manter um núcleo teórico de hipóteses e princípios essenciais (que dão uma identidade à grande teoria) a salvo de possíveis observações e experimentos que refutem um determinado programa de pesquisa.

O presente trabalho propõe o estudo de um exemplo simples de mecânica newtoniana que pode servir como um excepcional laboratório pedagógico dessas concepções filosóficas sobre a natureza da Ciência.

Modelo 1: disco rígido rolando horizontalmente

Consideramos um sistema ideal em que um disco rígido e uniforme de raio R e massa M rola livremente sobre um plano horizontal rígido sem deslizar (Hierrezuelo e Carnero, 1995). As forças que agem sobre o disco são a força peso, de módulo Mg , a força normal de contato, $\vec{N}$, e a força de atrito, $\vec{f}$, conforme mostra a figura.

Figura 1: Diagrama de Forças para o disco.



É imperativo considerar a força de atrito estática não-nula, pois do contrário, o disco nunca pararia. O movimento uniforme não condiz com o que observamos na realidade: se você deixar rolar uma moeda num piso horizontal, ela pode até demorar a parar, mas ela sempre para.

Nosso modelo pode ser então representado pelo diagrama da Figura 1, tendo como pano de fundo as leis de Newton da dinâmica. De acordo com a Segunda Lei de Newton, podemos escrever $N = Mg$ e

$$-f = Ma. \quad (1)$$

Aqui, a é a aceleração escalar do centro de massa do disco, sendo positiva se está apontada para a direita e negativa se está apontada para a esquerda, e este último caso é o que ocorre aqui: a equação acima nos obriga a escrever $a < 0$. O torque resultante sobre o disco, em relação ao seu centro de massa, pode ser escrito na forma $\tau = -fR$. De acordo com a mesma Segunda Lei de Newton, dessa vez aplicada às rotações, sabemos que esse torque resultante é igual ao produto entre o momento de inércia do disco em relação ao seu eixo de simetria, $I = MR^2/2$, e a sua aceleração angular, β . Observe que a convenção de sinais aqui é tal que o torque é negativo e a aceleração angular tem o sentido horário, indicado na Figura 1, correspondente a uma aceleração angular negativa, $\beta < 0$. A equação se escreve então na forma

$$-fR = I\beta = MR^2\beta/2. \quad (2)$$

A condição de não-deslizamento implica necessariamente a identidade $-R\beta = a$, lembrando que a é a aceleração do centro de massa do disco. Essa identidade já nos leva a uma contradição, pois $-R\beta$ é uma quantidade positiva e a é uma quantidade negativa. De qualquer modo, poderíamos prosseguir com a resolução da dinâmica do nosso modelo, escrevendo a seguinte equação a partir da Eq. (2):

$$f = Ma/2. \quad (3)$$

O sistema de equações (1) e (3) só possui a solução trivial $f = 0 = a$.

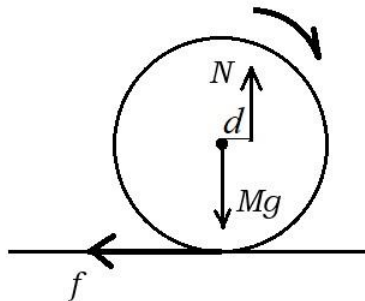
O modelo então padece de uma inconsistência com a observação. As Leis de Newton aplicadas ao disco levam à impossibilidade de movimento desacelerado, ou seja, apenas o movimento sem atrito e com velocidade constante é previsto pela teoria. Se tomarmos a concepção de Popper de um modo simplório, poderíamos dizer que a observação da desaceleração de um disco girando sobre uma superfície horizontal é um experimento que refuta (ou falseia) a mecânica newtoniana.

Entretanto, podemos conceber as Leis de Newton como um núcleo rígido de um grande edifício teórico, como idealizado na concepção de Lakatos, cercado por várias hipóteses auxiliares, como, por exemplo, que o corpo é totalmente rígido, que a força de contato atue exatamente sobre o centro de massa do disco etc. Assim, confirmando o mecanismo subjacente à Tese de Duhem-Quine, a observação da desaceleração do disco não refuta a teoria, mas nos obriga a modificar algumas hipóteses auxiliares, o que nos leva ao segundo modelo.

Modelo 2: disco quase rígido rolando horizontalmente

Não existe rigidez absoluta. Um corpo pode ser considerado rígido de forma aproximada, ou seja, sempre haverá pequenas deformações principalmente no ponto de contato entre o corpo e o piso. Essas deformações terão o efeito de deslocar um pouco o ponto de aplicação da força de contato, para uma reta cuja distância até o centro de massa vale d , conforme mostra a Figura 2.

Figura 2: Diagrama de Forças para o disco quase rígido.



A diferença fundamental entre esse modelo e o anterior é que a força de contato tem um torque diferente de zero, dado por $Nd = Mgd$, de sinal oposto ao sinal do torque $-fR$. Dessa forma, as equações dinâmicas para esse caso poderão ser escritas na forma da Eq. (1) e, no lugar da Eq. (2),

$$\tau = -fR + Mgd = I\beta. \quad (4)$$

O momento de inércia é o mesmo e a condição de não-deslizamento, a mesma: $-R\beta = a$. Assim, a Eq. (4) pode ser reescrita como

$$f = Mg \frac{d}{R} + \frac{1}{2}Ma. \quad (5)$$

O novo sistema de equações, Eqs. (1) e (5), pode ser resolvido para as variáveis f e a , e dessa vez a solução é não-trivial:

$$a = -\frac{2g}{3} \frac{d}{R}; \quad f = \frac{2Mg}{3} \frac{d}{R}. \quad (6)$$

Vimos então que a simples modificação de uma hipótese foi suficiente para tornar a observação da desaceleração do disco um experimento que corrobora com a teoria em vez de refutá-la.

Arbitrariedade na escolha do modelo

Sempre é possível conceber uma alteração diferente das hipóteses ou ainda escolher outras hipóteses a serem modificadas de modo a “salvar” a teoria, ou seja, de modo a obter a desaceleração observada em termos de um parâmetro quantitativo, que no caso do modelo 2, foi a distância d .

Por exemplo, poderíamos conceber um modelo em que o disco na verdade estaria subindo uma rampa de inclinação θ com a horizontal. O fato interessante que ocorre neste caso é que a força de atrito f inverte o sentido, e assim é possível resolver a dinâmica do sistema, em que a aceleração (negativa) pode ser expressa como

$$a = -\frac{2g}{3} \sin \theta. \quad (7)$$

Observe a equivalência quantitativa entre os parâmetros d/R e $\sin \theta$, em que pese o fato de que o modelo da rampa inclinada seja absurdo, pois a imposição de que um disco nunca role por uma superfície horizontal é em si um contrassenso. Ademais, ao rolar por uma superfície horizontal, por que o modelo da subida da rampa é melhor do que o da descida? Não tem sentido. Esse é um exemplo de que uma teoria com hipóteses irreais pode perfeitamente

ser corroborada pelas experiências – no entanto, provavelmente ela seria refutada por alguma outra experiência diferente.

Considerações Finais: Discurso Científico em Perspectiva

A rigor, não há nada que possa ser deduzido a partir de princípios físicos que proíba a existência de vários modelos com hipóteses exdrúxulas que prevejam resultados quantitativos condizentes com a observação. Na prática, os físicos em si mesmos proíbem e selecionam os modelos aceitáveis, que parecem razoáveis. O critério para isso não é estritamente científico, mas intuitivo, ou seja, baseado numa percepção instantânea de conjunto, que pode ser chamada de senso comum.

Encontramos aí um mecanismo presente na atividade científica que foge às regras usuais do chamado método hipotético-dedutivo. Ele consiste, em última análise, na liberdade de ordem imaginativa presente em toda a atividade de construção do discurso científico. É um elemento irracional, do mesmo tipo explorado na contribuição de Thomas Kuhn (1962) para a Filosofia da Ciência. Trata-se de um hiato na racionalidade característica das deduções e induções, que faz uso de outros níveis de linguagem e aponta para uma concepção do discurso científico como uma síntese coesa e complexa de diferentes níveis de linguagem (veja, por exemplo, o trabalho de Berredo-Peixoto (2025) que explora esse aspecto).

Na concepção de Kuhn, essa liberdade irracional se manifesta mais vigorosamente nas crises, em que um paradigma é substituído por outro paradigma (ou, em termos *lakatianos*, o núcleo rígido de um programa de pesquisa é descartado em favor de outro). Vemos no presente trabalho uma manifestação em pequena escala dessa força criativa irracional num exemplo simples de mecânica newtoniana, num período de ciência normal.

Agradecimentos

A Alice da Silva de Martin gostaria de expressar sua gratidão à PROPP/UFJF e FAPEMIG pela implementação de sua bolsa institucional PIBIC-JR (FAPEMIG).

Referências

- Berredo-Peixoto, G. (2025). Ciência e Discurso. In: Marcos Pereira dos Santos. (Org.). **Tópicos em Ciências Exatas e da Terra**. 1ed. Piracanjuba, GO: Editora Conhecimeto Livre, v. VIII, p. 73-83.
- Duhem, P. (1906). **La théorie physique: son objet et sa structure**. Paris: Chevalier et Rivière.
- Duhem, P. (1954). **The Aim and Structure of Physical Theory**, trad. Philip P. Wiener. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Hierrezuelo, J e Carnero, C. (1995). Sliding and rolling: the physics of a rolling ball. **Phys. Educ.** **30** 177, pp. 177-182.
- Kuhn, T. (1962). **The Structure of Scientific Revolutions**. Chicago: University of Chicago Press.
- Lakatos, I. (1978). **The Methodology of Scientific Research Programmes**. Cambridge: Cambridge University Press.
- Quine, W. van (1951). Two Dogmas of Empiricism. **The Philosophical Review**, vol. 60, n. 1. pp. 20–43.
- Popper, K. (1959). **The Logic of Scientific Discovery**. Londres: Routledge.
- Popper, K. (1992). **Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge**. Londres: Routledge.

3- Cianotipia e o desafio da lavagem: efeitos de alguns agentes de limpeza sobre o Azul da Prússia

Bárbara Lúcia de Almeida¹³
Cassiane Evangelista de Souza¹⁴
Fernanda Ximendes Ennes¹⁵

1. Introdução

O tingimento de tecidos é uma prática milenar, utilizada como forma colorir e dar vitalidade aos materiais têxteis. Em suas origens, os corantes e pigmentos eram obtidos exclusivamente de fontes naturais, como plantas, minerais e insetos. Com o tempo, as técnicas de tingimento foram progressivamente aprimoradas, acompanhando o crescimento da demanda por novas tonalidades. A limitação dos recursos naturais e o interesse por cores não disponíveis na natureza impulsionaram o desenvolvimento de alternativas químicas, culminando na descoberta dos corantes sintéticos na indústria.

Dentre os pigmentos químicos destaca-se o Azul da Prússia que durante o século XIX muito foi empregado no tingimento de tecidos de fibras naturais, como algodão, linho e seda. O processo industrial envolvia uma reação para obtenção do pigmento diretamente nas fibras dos tecidos: um primeiro banho mergulhando o tecido em uma solução de sais férricos, e um segundo banho com uma solução de ferrocianeto de potássio, formando o pigmento *in situ*. A simplicidade e a estabilidade química do método favoreceram sua difusão em ateliês e manufaturas, especialmente na América do Norte, onde se popularizou em produtos têxteis domésticos.

É importante ressaltar que existe diferença entre tingimento e estamparia. O tingimento do tecido trata-se de técnicas em que o tecido adquire

¹³ Doutor(a) em Química, Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Química barbara.almeida@ufjf.br

¹⁴ Graduanda em Ciência Exatas. Bacharelado em Ciências Exatas
cassiane.souza@estudante.ufjf.br

¹⁵ Licenciada em Química f.ennes.fx@gmail.com

uma cor uniforme, enquanto na estamparia as técnicas aplicadas levam a formação de imagens ou padrões localizadas sobre o tecido.

Dentre as várias possibilidades de processos de estamparia, uma técnica pouco convencional é a que emprega reações fotoquímicas para a estamparia têxtil. Esses processos, fundamentados em reações de oxidação e redução, aproximam-se das práticas de fotografia alternativa, como a cianotipia.

A técnica de impressão fotográfica chamada cianotipia, foi desenvolvida em 1842 por Sir John Herschel, utiliza sais férricos fotossensíveis que, sob exposição à radiação ultravioleta, originam o pigmento Azul da Prússia. Inicialmente aplicada à reprodução de desenhos técnicos (daí vem a origem do termo *blueprint*), a técnica foi rapidamente incorporada às artes visuais e à estamparia têxtil, possibilitando a criação de imagens decorativas sobre papel e tecido.

Durante o processo de tingimento ou estamparia um dos desafios enfrentados pelos artistas é fazer com que o corante ou pigmento utilizado, tenha aderência nas fibras têxteis. Para solucionar este problema é comum o uso de substâncias ligantes, também conhecidas como mordentes (que vão fazer com que o corante fique aderido as fibras dos tecidos). A adição das substâncias ligantes pode comprometer a flexibilidade dos tecidos.

Os processos fotográficos à base de ferro demonstraram-se especialmente adequados a serem aplicados a suportes têxteis por dispensarem o uso de mordentes, ou seja o uso de substâncias ligantes que podem comprometer a flexibilidade do material. Estudos realizados por John Mercer no século XIX evidenciaram a viabilidade da impregnação de tecidos com soluções fotossensíveis, abrindo caminho para o diálogo entre fotografia e estamparia, campo ainda explorado por artistas e pesquisadores contemporâneos (WARE, 2014). Assim, a cianotipia têxtil contemporânea preserva a integridade do processo original.

Esse conjunto de características torna a técnica cianotipia um objeto de estudo relevante para investigações sobre materiais fotossensíveis, processos oxidativos, conservação e lavagem dos tecidos e interfaces entre ciência e arte, evidenciando seu potencial pedagógico, artístico e científico.

2. Conservação e lavagem de tecidos estampados com cianotipia

A conservação de tecidos estampados por meio da técnica da cianotipia apresenta desafios específicos decorrentes da natureza química do pigmento

formado e das condições de uso do suporte têxtil. Os tecidos estampados podem ser elementos de uso cotidiano, como vestimentas, bolsas, lenços, roupas de cama e, por isso, estão mais expostos à ação da luz, da umidade, de substâncias químicas e de lavagens repetidas portanto estão sujeitas a constantes interações físicas, químicas e ambientais.

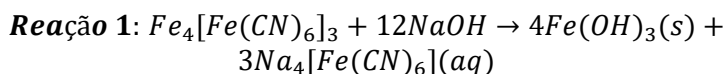
O pigmento Azul da Prússia, formado durante o processo de cianotipia, é quimicamente sensível às variações de pH e à presença de agentes oxidantes. A lavagem inadequada pode promover alterações químicas no pigmento, resultando em desbotamento e mudanças tonais da coloração azul característica. Observações empíricas realizadas pelos usuários dos tecidos indicam que determinados tipos de sabões ou detergentes aceleram a degradação cromática da imagem, comprometendo sua estabilidade a longo prazo.

Daí a necessidade de conhecer as reações de degradação do pigmento Azul da Prússia, e os tipos de sabão que podem proporcioná-las.

3. Reação de degradação do Azul da Prússia em meio alcalino.

O Azul da Prússia ($Fe_4[Fe(CN)_6]_3$) é um pigmento sintético moderno, descoberto em Berlim no início do século XVIII. Por sua cor intensamente saturada e pelo baixo custo de produção, rapidamente conquistou popularidade entre artistas e foi amplamente empregado em pinturas até a década de 1970. No entanto, já em meados do século XVIII sua estabilidade vinha sendo contestada, uma vez que o pigmento demonstrava tendência a desbotar, indicando que o pigmento não é quimicamente estável em todas as condições, principalmente em pH alcalino, como é o caso dos agentes de limpeza.

Em ambientes contendo substância básicas, ou seja, substâncias que geram pH alcalino, o Azul da Prússia pode se degradar, perdendo sua cor azul característica, formando outros compostos. Em contato com ambientes alcalinos, vai ocorrer a formação do subproduto sólido, o hidróxido de ferro (III) ($Fe(OH)_3$), que aparece como um precipitado de coloração amarelada, ou marrom-avermelhada ou marrom-escura (Reação 1). Este fato explica a observação do desbotamento de tecidos quando lavados com sabões escolhidos sem critério.



4. Tipos de sabões

Para compreender como a escolha dos agentes de limpeza influencia no processo de limpeza e na durabilidade das imagens nas peças confeccionadas com cianotipia, é necessário compreender as características dos produtos de limpeza que usamos na lavagem das peças. Sabões e detergentes são os produtos mais utilizados na lavagem, mas quimicamente eles são diferentes.

O sabão é produzido a partir de gorduras naturais (óleos vegetais ou gorduras animais) que reagem com uma base forte, como a soda cáustica (hidróxido de sódio). Essa reação, chamada saponificação, cria moléculas que apreseem estruturas com duas partes, chamadas tensoativos. Uma parte da molécula do sabão é atraída pelas moléculas de água no processo de lavagem, a outra parte da molécula é atraída pelas gorduras, ou pelas sujeiras. É essa estrutura que permite ao sabão soltar a sujeira dos objetos, da pele ou dos tecidos e levá-la embora com o enxágue. Como o sabão resulta de uma reação de gorduras ou óleos com uma base, o sabão tem pH alcalino, ou seja, maior que 7. Este tipo de sabão alcalino é desejável para a limpeza pesada, com materiais difíceis de limpar. Entretanto não é adequado para o contato direto com a pele, ou com materiais delicados pois pode causar ressecamento ou alterar cores de tecidos.

Os detergentes, por outro lado, são substâncias sintéticas, criadas a partir de compostos derivados do petróleo ou de outras fontes químicas. A estrutura dos detergentes e dos sabões é parecida, pois eles também são capazes de interagir com água e gordura durante o processo de lavagem, mas por serem obtidos através de reações químicas diferente dos sabões, os detergentes podem ser formulados com muito mais controle.

Enquanto o sabão tem um pH alcalino, que é definido pela própria reação de saponificação, o detergente pode ter seu pH ajustado artificialmente. Isso é feito com substâncias químicas chamadas de aditivos, que equilibram a acidez ou a alcalinidade conforme a finalidade do produto. Assim, existem detergentes neutros, indicados para uso doméstico e delicado; detergentes ligeiramente ácidos, usados em limpezas específicas; ou detergentes alcalinos, para remover sujeiras mais resistentes.

Entre os aditivos usados no setor de limpeza, para promover limpezas específicas, destaca-se os alvejantes, produtos formulados para remover manchas resistentes que o detergente comum não consegue eliminar, deixando os tecidos mais brancos e com aspecto renovado. Os primeiros alvejantes eram

à base de cloro, porém, atualmente, muitas empresas têm investido em formulações com peróxidos, que apresentam maior poder de limpeza, podem ser usados em roupas brancas e coloridas, preservam melhor as fibras têxteis e reduzem os riscos ao consumidor durante o uso.

Atualmente, os alvejantes domésticos disponíveis no mercado geralmente se dividem em dois grupos: os alvejantes à base de cloro (como o hipoclorito de sódio) e os alvejantes à base de compostos peróxidos (como o peróxido de hidrogênio, os percarbonatos e os perboratos). Outro aditivo que podemos citar são os fosfatos. O detergente em pó para lavar roupas é um exemplo de detergente que possui aditivos como o trifosfato de sódio. A função de adição dos fosfatos nos detergentes é facilitar a formação das espumas, mesmo em água salobra (água com muitos sais dissolvidos), e manter o sabão mais alcalino para aumentar seu poder de limpeza.

Em resumo: o sabão nasce de um processo natural e carrega um pH básico por origem; o detergente, criado pela química moderna, pode ser moldado para cada situação, com o uso de aditivos químicos, que formam detergentes com pH alcalinos. E em todos os casos, eles podem influenciar na estabilidade do azul da Prússia nos tecidos. O sabão, por ser originalmente alcalino, cria durante a lavagem um meio básico diretamente desfavorável à estabilidade do Azul da Prússia. Nessas condições, o pigmento pode sofrer degradação química, gerando espécies como o hidróxido de ferro (III), de cor amarronzada, e este processo se manifesta visualmente como desbotamento da imagem.

Comparativamente, o uso de detergentes pode se mostrar seguro ou arriscado. Isso vai depender da formulação do detergente. Se eles forem ajustados para serem neutros ou menos alcalinos, não terão impacto sobre o pigmento; já formulações com aditivos alcalinizantes ou oxidantes (como alvejantes peróxidos ou clorados) potencializam a degradação do Azul da Prússia. Dessa forma, a escolha do agente de limpeza não é trivial, bastando escolher os detergentes e evitar os sabões, mas é necessário observar a composição química dos produtos. Para demonstrar a influência da composição química dos sabões e detergentes na lavagem dos tecidos com cianotíпия, foram realizados alguns testes de lavagem que serão descritos a seguir.

5. Metodologia dos testes: PARTE DA CASSIANE/FERNANDA

Com o objetivo de avaliar de forma qualitativa a influência de diferentes agentes de limpeza sobre a estabilidade do pigmento Azul da Prússia,

foi conduzido um experimento controlado utilizando duas amostras de tecido (brim) de algodão 100%, adquirido no comércio local. Para obtenção das imagens com cianotipia nos tecidos, as amostras foram sensibilizadas de acordo com o protocolo clássico de cianotipia e expostas sob as mesmas condições de luz ultravioleta por 15 minutos, resultando em tecidos estampados com imagens em Azul da Prússia (ANDERSON, 2019). Após a revelação e secagem, foram aplicados distintos agentes de limpeza, de modo a observar e comparar os efeitos sobre a integridade visual e química das impressões obtidas. As amostras foram divididas para os testes com sabão (Teste 1) e com detergente (Teste 2).

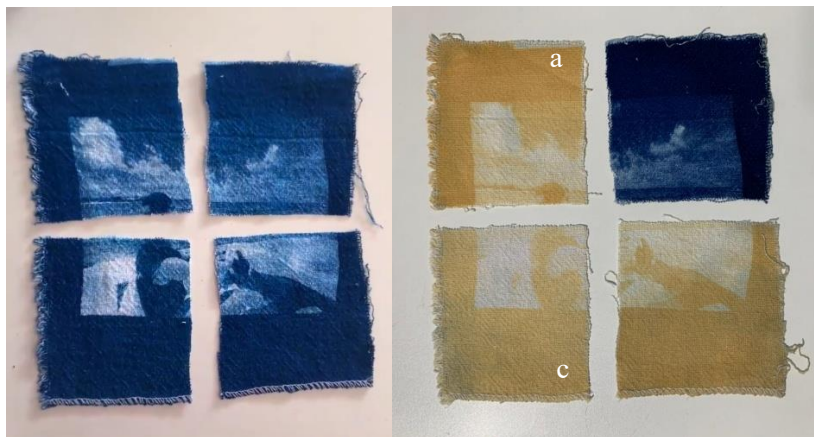
Cada amostra de tecido de algodão (100%), previamente estampada por cianotipia, foi dividida em quatro segmentos de dimensões equivalentes, resultando em 8 pedaços iguais (cerca de 15x15cm cada). Seis desses segmentos foram submetidos à imersão em soluções contendo agentes de limpeza, ao passo que os dois segmentos que sobraram foram imersos exclusivamente em água destilada, atuando como amostras controle.

5.1 Teste 1: com sabão

Foram selecionados três agentes de limpeza comerciais no estado sólido: sabão de coco em barra, sabonete infantil e detergente em pó. Foram preparadas três soluções para realização do teste de lavagem. Para cada solução foi pesado 10 g do agente de limpeza que foi dissolvido em 100 ml de água da rede pública de abastecimento, a temperatura ambiente. A seguir cada amostra de tecido foi mergulhada na solução contendo o agente de limpeza. A amostra controle foi imersa apenas em água da rede pública de abastecimento.

As quatro amostras foram mantidas em imersão por até 2 h. O grau de desbotamento das imagens impressas com o azul da Prússia foi acompanhado por meio de inspeções visuais e registro fotográfico em intervalos regulares de 30 min. Os efeitos observados ao final das duas horas para cada condição experimental são apresentados na Figura 1.

Figura 1: Tecido antes e depois da lavagem com (a) sabonete infantil em barra, (b) água pura, (c) sabão em pó e (d) sabão de coco em barra.



Fonte: acervo do autor.

5.2 Teste 2: com detergente

Foram selecionados três agentes de limpeza comerciais no estado líquido: shampoo infantil, sabonete de banho líquido e detergente de cozinha neutro. Para cada agente, foi preparada uma solução contendo 4ml do produto dissolvidos em 100 mL de água da rede pública de abastecimento a temperatura ambiente.

Da mesma forma que o teste anterior, as quatro amostras foram mantidas em imersão por até 2 h, sendo que a amostra controle foi imersa apenas em água da rede pública de abastecimento.

O grau de desbotamento das imagens impressas com o azul da Prússia foi monitorado por meio de inspeções visuais e registro fotográfico em intervalos regulares de 30 min. Após 2 horas de imersão nas soluções dos agentes de limpeza os tecidos não apresentaram variação visível a olho nu no tom de azul das imagens.

6. Resultados e discussão

Os testes foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento de tecidos estampados com cianotipia frente à lavagem com diferentes agentes de limpeza sabões e detergentes com formulações químicas diferentes. A escolha do tempo do molho foi baseada no tempo médio do contato da água

com os tecidos em máquinas de lavar roupas utilizadas no dia a dia, e que não utilizam água quente.

A escolha pelo sabão em barra foi feita devido ao fato de os sabões terem características alcalinas desde a síntese até o produto e que são as primeiras escolhas realizadas pelos artesãos e artistas quando vão lavar as cianotipias, conforme depoimentos obtidos via redes sociais do projeto de extensão “Química Fotografia e Arte”. As justificativas apresentadas são de que o sabonete infantil “deve ser menos agressivo, já que foi feito para pele de bebês” e o sabão de coco é normalmente escolhido por “ser um sabão natural, não tem muita química”. Estes relatos mostram que as escolhas não usam critérios químicos, apenas o conhecimento popular com relação ao uso dos produtos. Não houve relato sobre escolher detergentes de cozinha, de banho ou mesmo shampoo, uma vez que o uso deste tipo de agente de limpeza não está relacionado a lavagem de tecidos.

Após a imersão dos tecidos nas soluções de sabão foi possível observar que ocorreu o desbotamento das peças, ou seja, a mudança de cor do azul para o amarelo. É interessante notar que o desbotamento apresentado pelo sabão de coco e pelo sabão em pó foram rápidos enquanto o desbotamento causado pelo sabonete infantil foi mais lento. Isto pode ser explicado pois os sabões de coco e os sabões em pó são alcalinos e quando o azul da Prússia do tecido tem contato com o meio alcalino gerado pelos sabões ele se degrada e forma os hidróxidos de ferro, tal como proposto na reação 1, e o produto formado apresenta a coloração amarelada, tal como previsto. Já o sabonete infantil pode apresentar no rótulo do produto a informação de ser um agente de limpeza com pH neutro, uma vez que foi desenvolvido para ser usado para limpeza delicada. Entretanto ao medir o pH da solução do sabonete infantil com uma fita universal, foi encontrado o pH entre 7-8, ou seja, levemente alcalino. Este fato justifica o desbotamento mais lento. É importante ressaltar que cada sabonete pode apresentar um comportamento, a depender da sua formulação.

Deve-se ter em mente que o agente de limpeza popularmente conhecido como sabão em pó comercial, é um detergente em pó, e em sua composição pode apresentar alvejantes ou agentes oxidantes, o que torna o meio alcalino no processo de lavagem, por isso também leva ao desbotamento da imagem dos tecidos.

Já no caso das amostras que foram lavadas em soluções de detergentes líquidos, o resultado foi diferente. Os detergentes foram escolhidos segundo o critério de terem suas formulações diferentes entre si e mais suaves, para

contato direto com a pele no caso de banho, infantil ou no uso cotidiano da cozinha. Estes produtos apresentam no rótulo a informação sobre o pH do agente de limpeza: se é neutro ou levemente ácido, não apresentando na composição alvejantes ou oxidantes químicos.

Após a imersão das amostras nas soluções contendo detergente, nenhuma das amostras apresentou desbotamento visível ou alterações significativas na tonalidade azul característica do pigmento Azul da Prússia, após as 2 horas de imersão. As imagens nos tecidos mantiveram sua definição e intensidade, sem sinais de descoloração ou migração do pigmento para áreas adjacentes do tecido (formação de manchas). O grupo controle, submerso apenas em água, permaneceu visualmente igual às demais amostras, conforme indicado na Tabela 1:

Tabela 1. Cores das imagens após o contato com diferentes agentes de limpeza sobre amostras de tecido de acordo com o tempo de imersão.

Agente de limpeza	Imediato	Após 5 min	Após 20 min	Após 30 min	Após 2 horas
Controle (água pura)	Azul	Azul	Azul	Azul	Azul
Sabão de coco	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo
Sabão em pó	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo
Sabonete infantil	Azul	Azul	Amarelo	Amarelo	Amarelo
Detergente neutro	Azul	Azul	Azul	Azul	Azul
Sabonete líquido	Azul	Azul	Azul	Azul	Azul
Shampoo infantil	Azul	Azul	Azul	Azul	Azul

Fonte: Próprio Autor (2025)

Esses resultados indicam que os agentes de limpeza com pH neutro ou levemente ácido, segundo as descrições dos rótulos, não promoveram degradação do Azul da Prússia sob as condições avaliadas, mesmo após duas horas de contato contínuo. Tal comportamento demonstra a boa estabilidade do pigmento em meios suaves, sugerindo que agentes de limpeza formulados para lavagens delicadas e formulações equilibradas quanto ao pH tendem a preservar a integridade das estampas produzidas por cianotipia.

7. Conclusão

Após a realização dos testes, recomenda-se que a higienização de tecidos estampados com cianotipia observe duas precauções fundamentais:

1. Verificar o pH no rótulo do produto, e a composição química quanto a ausência de fosfatos, alvejantes ou oxidantes;
2. Realizar um teste preliminar em pequeno pedaço do tecido antes da lavagem completa da peça.

Além da leitura dos rótulos para conhecer a composição química, é importante realizar um teste de lavagem antes de mergulhar o tecido pois cada agente de limpeza de marcas diferentes, pode apresentar variação na composição, o que pode levar a diferentes resultados. Além disso em cada país há uma legislação sobre a composição dos detergentes. É importante ressaltar ainda que a indicação do produto ser para lavagem delicada, não garante a estabilidade do Azul da Prússia.

Sugere-se que o tempo de contato do tecido com água pura não deve ser muito longo. Testes realizados com cianotipia em papel mostram que a água pura, se houver um contato de longo tempo com a imagem (a partir de 4-5 horas de imersão do papel), é capaz de realizar a hidrólise do azul da Prússia, ou seja vai ocorrer o desbotamento com a formação da imagem azul. É possível que o resultado se repita em cianotipia em tecidos. Outro teste realizado pelo nosso grupo em cianotipia em papel, é o contato com a água quente (aproximadamente 100°C). Neste caso o azul da Prússia tem um desbotamento parcial, e fica uma imagem em tons esverdeados devido a mistura de azul da Prússia e produtos de hidrólise que são amarelos. Desta forma não se recomenda a lavagem de tecidos estampados com cianotipia com água quente.

O uso de ferro de passar não apresenta riscos significativos, desde que o procedimento seja realizado em temperatura moderada e sem aplicação direta de vapor. O uso de amaciante também não comprometeu a estampa do tecido. Outra informação relevante é quando ao tipo de tecido. Os testes do presente trabalho foram realizados em tecido do tipo brim 100% algodão. Diferentes tecidos podem apresentar resultados diferentes com a perda da intensidade dos tons azuis.

É importante salientar que qualquer processo de lavagem — ainda que conduzido com sabões neutros e técnicas delicadas, pode reduzir gradualmente a intensidade do azul. Tal efeito deve-se à sensibilidade do Azul da Prússia ao

atrito mecânico e às variações de composição da água empregadas. A compreensão desses fatores é essencial para a formulação de estratégias de conservação preventiva em artefatos têxteis produzidos por cianotipia. Os tecidos testados neste trabalho não foram submetidos a lavagem mecânica.

Finalmente, os resultados apresentados são de caráter qualitativo e indicam que os detergentes líquidos de formulação suave são os mais indicados para lavagem de tecidos com cianotipia. Os resultados mostraram também que nos casos dos sabões sólidos testados, nenhum apresentou bom resultado, indicando, de maneira preliminar, que seu uso para lavagem de tecidos com cianotipia deve ser evitado.

Referências

- Anderson, C. Z. **Cyanotype: The Blueprint in Contemporary Practice**. CRC Press, ch11, (2019).
- Barbosa André Borges; Silva, Roberto Ribeiro da. **Química nova na escola** Xampus. nº 2, novembro 1995.
- Demarchi, Ana Carolina; Santana, Beatriz. Processo de tingimento de material têxtil. **Revista Científica de Ciências Aplicadas da FAIP**, vol. 9, nº 16, 2022/2.
- Ibrahima, Asmaa A; Elsayedb, Maysa F.; Ibrahimb, Dalia F.; Khodary, Marwa M. M. Cyanotype Printing Technique Using Redox System in Application of Printed Hanging Fabrics Designs. **Egypt. J. Chem.** Vol. 66, nº. SI: 13, pp. 541 - 549 (2023).
- Machado de Araújo, Maria Eduarda. **Corantes naturais para têxteis** – da Antiguidade aos tempos modernos. Conservar Patrimônio, núm. 3-4, diciembre, 2006, pp. 39-51.
- Madalena Martins Ribeiro. Estudo de alvejantes à base de peróxido de hidrogênio. **Monografia** apresentada ao Curso de Química Tecnológica do CEFET-MG como parte das exigências da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II (TCC II). Orientador: Prof. Emerson Fernandes Pedroso, Belo Horizonte – MG, 2011.
- Mendesa, Bruna Rafaela; Shimabukuroa; Danielle Midori; Ubera, Marjorie; Abagge, Kerstin Taniguchi. Critical assessment of the pH of children's soap. **J Pediatr (Rio J)**. 2016;92(3):290-295.
- Viktoria Klara Lakatos Osorio; Wanda de Oliveira. Polifosfatos em detergentes em pó comerciais. **Quim. Nova**, Vol. 24, No. 5, 700-708, 2001.
- Ware, M. **Cyanomicon. Autopublicação**. Recuperado de “<https://www.mikeware.co.uk/mikeware/downloads.Html>, (2014).

4- Desenvolvimento de um laser de Titânio: safira de femtossegundos

Isis Lee da Silva¹⁶
Giovana Trevisan Nogueira¹⁷

Introdução

O início do século XX foi determinante para o desenvolvimento da física como temos hoje o surgimento Mecânica Quântica, que fundamentou o princípio de funcionamento do laser por Charles Townes e Arthur Schawlow no final da década de 1950 e a sua demonstração experimental por Theodore Maiman na década de 60 (Seara da Ciência, 2013).

O primeiro laser, desenvolvido por Maiman em 1960, utilizava rubi sintético e emitia pulsos curtos (milissegundos de duração), mas apresentava instabilidade e era de difícil manuseio e manutenção (Optical Engineering, 2010).

Nas décadas seguintes, novas tecnologias surgiram, destacando-se, nos anos 1990, os lasers de Titânio:safira (Ti:safira), capazes de gerar pulsos ultracurtos na escala de femtossegundos (10^{-15} s), revolucionando áreas como a óptica não linear. Devido à sua alta intensidade, estabilidade e espectro amplo, lasers desse tipo têm aplicações em metrologia (Silva, 2012), femtoquímica (Cruz e Fragnito, 2000), fotoquímica (Cruz e Fragnito, 2000), espectroscopia de materiais (Lopez e Barbosa, 2008) e óptica quântica (Cruz e Fragnito, 2000) entre outras.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um laser de Ti:safira de femtossegundos, que emite um espectro supercontínuo, isto é, espectro que cobre desde 500 nm (região verde do espectro eletromagnético) até 1100 nm (luz infravermelha) simultaneamente, para utilização na área de metrologia de

¹⁶ Doutora em Física pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Departamento de Física. E-mail: isisleesilva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3689-833X>.

¹⁷ Doutora em Ciências pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Departamento de Física. E-mail: giovana@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5735-4131>.

tempo e frequência como um sistema de medida de frequência óptica de alta precisão.

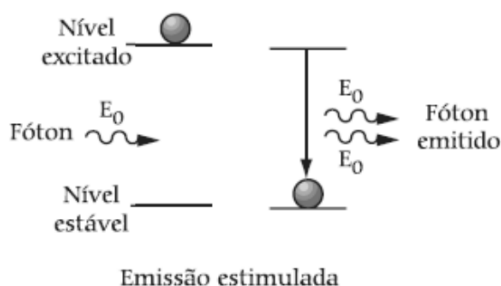
Este estudo foi resultado de uma sequência de projetos de iniciação científica na UFJF, que ocorreram entre os anos de 2010 à 2014, no laboratório de Lasers e Aplicações do Departamento de Física do Instituto de Ciências Exatas da UFJF, sendo na época a autora Isis Lee da Silva aluna de graduação do curso de Bacharelado em Física e a autora Giovana Trevisan Nogueira, como sua orientadora. Ele envolveu basicamente quatro etapas: desenvolvimento e montagem do sistema óptico laser em questão; desenvolvimento de sistema de controle retroalimentado da frequência de emissão; caracterização espectral, de potência e de ruído do sistema desenvolvido.

Emissão, geração e propagação de pulsos ultracurtos

Laser significa amplificação da luz por emissão estimulada de radiação (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – LASER)(Silva, 2010). O processo de emissão estimulada da luz ocorre quando um átomo se encontra no estado excitado e um fóton externo estimula seu decaimento para um nível de mais baixa energia, emitindo um outro fóton (Figura 1). O fóton que estimulou o decaimento sai intacto e o outro é gerado com as mesmas características do que o estimulou. Esses dois fótons vão perturbar outros átomos em estados excitados fazendo com que a emissão de mais fótons ocorra continuamente (Bagnato, 2001) em um efeito em cascata.

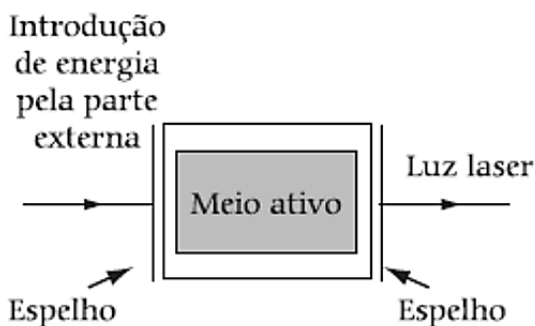
Um sistema laser é composto por três partes principais: o meio ativo (ou de ganho), a fonte externa de energia e a cavidade óptica (Figura 2). O meio ativo pode ser sólido, líquido ou gasoso, e contém os átomos responsáveis pela emissão dos fótons. A fonte de energia (descarga elétrica, corrente elétrica ou outro laser) excita os elétrons do meio ativo, promovendo a inversão de população, condição essencial para a emissão estimulada.

Figura 1: Esquema do processo de emissão estimulada.



Fonte: Bagnato (2001).

Figura 2: Esquema básico da cavidade de um laser.



Fonte: Bagnato (2001).

A cavidade óptica, formada por espelhos altamente refletores (um deles parcialmente transmissor para a saída do feixe), confina e reflete a luz, permitindo a amplificação contínua do processo. Dessa forma, a luz laser gerada é intensa, coerente e direcional.

O meio de ganho pode ser sólido, líquido ou gasoso. Esta parte é a que contém as moléculas ou átomos, que através das mudanças de níveis emitem os fótons, que constituirão a luz laser. É o tipo de material que compõe o meio de ganho que define o comprimento de onda emitido pelo sistema laser. Para que os elétrons se encontrem em níveis excitados é necessário fornecer energia. Este é o papel da fonte externa, que pode ser uma descarga elétrica, no caso de lasers cujo meio de ganho é um gás, corrente elétrica em lasers de diodo, ou até mesmo outro laser, para lasers de estado sólido ou de corante (meio líquido).

Geração de pulsos ultracurtos

A geração de pulsos ultracurtos, com duração temporal da ordem de femtossegundos, baseia-se na interferência construtiva de modos longitudinais em lasers altamente multimodos (acoplamento de modos ou *mode-locking*). Modos longitudinais são componentes da luz laser de diferentes frequências possíveis de serem confinados na cavidade óptica, determinados por uma combinação do espectro de emissão do meio de ganho e do comprimento do caminho óptico dentro da cavidade, que, em geral, é determinada basicamente pelo tamanho da cavidade óptica. O laser de Ti:safira, por exemplo, pode chegar a ter 20.000 modos longitudinais oscilando simultaneamente. Quando os modos longitudinais desses lasers oscilam com fase completamente aleatória entre si no domínio de tempo, a energia está distribuída também aleatoriamente entre os modos, o que corresponde a uma saída de luz com potência constante no tempo, mas ruidosa. Para que o pulso se forme, é necessário forçar as diversas componentes de frequência (modos longitudinais) a oscilarem correlacionadas no tempo. No caso ideal, as componentes de frequência oscilam todas coerentes entre si, provocando regiões de interferência construtiva (pulsos de femtossegundos) e regiões de interferência destrutiva (período entre dois pulsos) (Figura 3).

Para uma cavidade óptica de caminho óptico total L , as frequências permitidas para oscilação laser são aquelas que produzem um mínimo de intensidade nas extremidades da cavidade, dadas por:

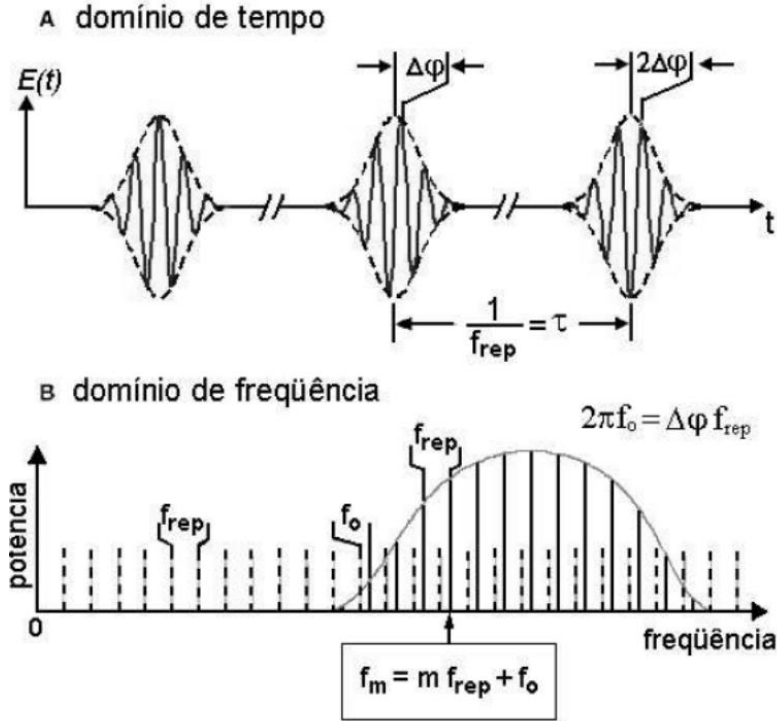
$$f_m = n \frac{c}{2L}, \quad (\text{eq. 1})$$

sendo f_m as frequências permitidas na cavidade, c a velocidade da luz e m um número inteiro. A quantidade de modos longitudinais e quais são estes, dependem do tipo de cavidade utilizada e da banda de emissão do meio de ganho. O campo eletromagnético na saída está associado aos campos existentes para cada frequência permitida pelo ressonador, e pode ser escrito pelo seguinte somatório:

$$E(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_n(t) e^{i[2\pi f_n t + \varphi(t)]} \quad (\text{eq. 2})$$

onde $E_n(t)$ representa o campo elétrico existente em cada uma das frequências dentro da cavidade e $\varphi(t)$ suas fases relativas.

Figura 3: (A) Sequências de pulsos no domínio tempotral (B) No domínio de frequência, observamos os modos transversais da cavidade óptica, separados por uma frequência f_{rep} , e a envoltória definida pelo meio de ganho.



Fonte: Nogueira (2007)

O pulso possui um tempo de circulação dentro da cavidade, tempo este que pode ser calculado a partir do comprimento da cavidade L . A separação entre os pulsos é dada pelo tempo de circulação de cada pulso dentro da cavidade, dado por:

$$T_c = \frac{L}{c} \quad (\text{eq. 3})$$

Autofocalização e a não linearidade do índice de refração

Em fontes de luz de alta intensidade de emissão o índice de refração do meio de ganho pode depender da intensidade da própria luz produzida, gerando uma não linearidade do mesmo.

Para melhor entender como esses efeitos não lineares podem ser significativos, é necessário escrever o índice de refração de materiais não lineares da seguinte forma (Cruz e Fragnito, 2000):

$$n = n_0 + n_2 I \quad (\text{eq. 4})$$

onde, I é intensidade da luz, n é o índice de refração do meio, n_0 é o índice de refração linear, que observamos quando a luz incidente em um meio é de baixa intensidade (luz ambiente solar, lâmpadas, lasers em regime contínuo em geral). n_2 é o índice de refração não linear e só é significativo quando I é alto o suficiente para que o termo $n_2 I$ possua valores da mesma ordem de grandeza de n_0 .

Como exemplo, podemos considerar o próprio cristal de Ti:safira, que possui $n_0 = 1.8$ e $n_2 = 4 \times 10^{-16}$ (Silva, 2017). Consideremos primeiramente a incidência, neste cristal, de um laser de baixa intensidade como, por exemplo, um laser em regime de emissão contínua com potência de 1 W. Focalizando este laser em uma área de $1 \mu\text{m}$ de raio, obtemos $I = 2 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$. Utilizando a equação 4 com os parâmetros do Ti:safira, vemos que, neste caso, temos que:

$$n_2 I \sim 4 \times 10^{-9} \ll n_0 = 1.8$$

Lasers pulsados, entretanto, na maioria das vezes, são fontes de alta intensidade, pois concentram a energia emitida em um intervalo muito curto de tempo. Um dos principais lasers de alta intensidade usados atualmente são os lasers de Ti:safira de pulsos ultracurtos, os quais podem-se gerar pulsos menores que 10 fs (10×10^{-15} s) e com intensidade de pico que pode chegar a $I = 10^{18} \text{ W/cm}^2$.

Neste caso, a luz laser emitida pelo cristal de Ti:safira pode provocar efeitos não lineares no próprio meio de ganho do laser, pois:

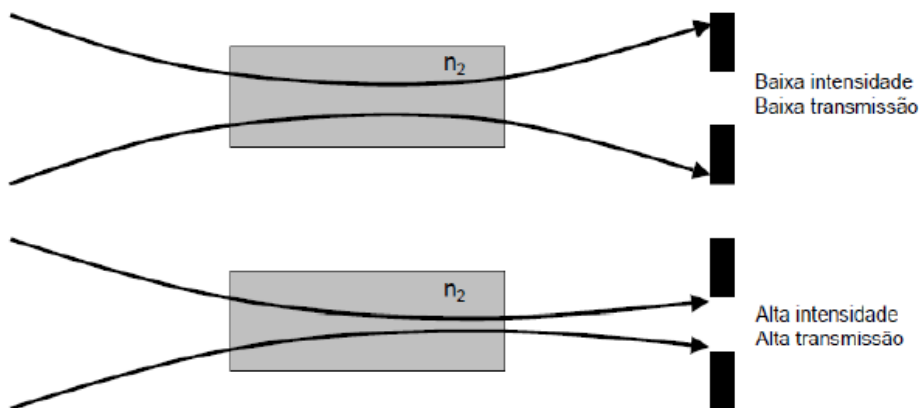
$$n_2 I \sim 4 \times 10^{11} \gg n_0 = 1.8$$

Neste caso, portanto, o índice de refração do material sofre alteração devido à intensidade da luz incidente, alterando as propriedades ópticas do material.

A luz laser que se propaga dentro uma cavidade óptica, seja ela pulsada ou contínua, apresenta uma variação espacial de intensidade ao longo do raio do feixe laser, sendo mais intenso no centro e mais fraco conforme se aproxima das extremidades. Essa variação pode causar uma variação espacial do índice de refração ao longo da seção transversal do cristal. Se o termo $n_2 I$ da equação 4 for alto o suficiente, que é o caso no surgimento de pulsos, a alteração do

índice de refração do Ti:safira tende a ser mais intensa na região central do feixe laser do que nas bordas, induzindo a formação de uma lente convergente no próprio cristal. Com isso, se a oscilação é pulsada, o feixe de luz passa a ser autofocalizado, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4: Figura retirada de Cruz e Fragnito (2000). Variação da transmitância por efeito da autofocalização (Kerr Lensing).



Fonte: Cruz e Fragnito (2000).

Laser de Ti:safira

Os lasers de Ti:safira são lasers de estado sólido e podem operar em duas configurações, com regime pulsado (*mode-locked*) e contínuo (*Continuous Wave – CW*), distintas tanto no modo de operação quanto na estrutura física. Elas diferem-se no formato da cavidade e em elementos óticos intracavidade.

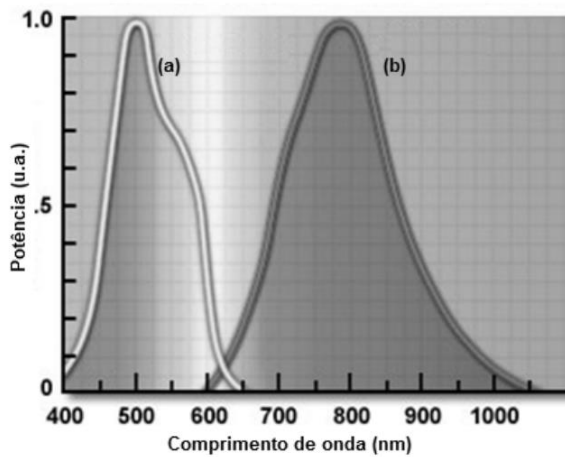
Nos dois regimes, o meio de ganho do laser é o cristal de safira dopado com íons Ti^{3+} (abreviado por Ti:safira), mostrado na Figura 5. O cristal de Ti:safira absorve luz na faixa de 500 nm para a emissão na faixa de 700 nm à 1000 nm como ilustrado na Figura 6. Dessa forma, o sistema laser de Ti:safira possui como fonte de energia um laser externo na região próxima de 500 nm incidente no cristal de Ti:safira e produz luz laser na faixa do infravermelho (~ 800 nm).

Figura 5: Cristal de Ti:safira.



Fonte: Acervo das autoras.

Figura 6: Espectros de absorção (a) e de (b) emissão do Cristal de Ti:sa.



Fonte: Nogueira (2007)

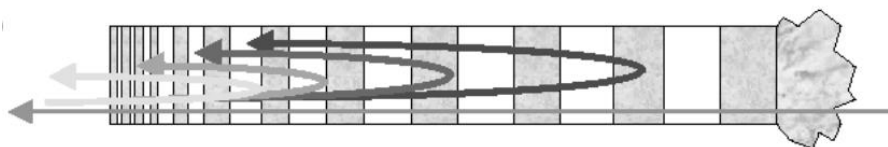
O laser de Ti:safira no regime CW pode ter em sua cavidade, quando necessário, elementos intracavidade para deixá-lo com um único modo de oscilação ou para sintonia do comprimento de onda. Para o regime de funcionamento pulsado, o laser precisa de elementos intracavidade para forçar e manter a oscilação em fase dos modos longitudinais. Um mecanismo muito utilizado para favorecer o regime pulsado é a utilização da autofocalização (Figura 4) que modifica o caminho óptico dentro da cavidade quando o laser entra em regime pulsado. Com o ajuste da distância focal de lentes e espelhos curvos e a autofocalização induzida por pequenas perturbações no laser, a cavidade óptica pode ser otimizada para suprimir o regime CW e condições favoráveis para o regime pulsado (Pinto, 2025).

Para manter o regime pulsado, também é necessário observar as condições de dispersão de velocidade de grupo da cavidade óptica. A dispersão de velocidade de grupo (GVD) é um fenômeno em um meio dispersivo onde a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende da frequência, resultando em diferentes frequências (modos longitudinais) que compõem um pulso viajando em diferentes velocidades. Isso causa a distorção ou espalhamento do pulso ao longo do tempo.

O cristal de Ti:safira insere dispersão positiva de $+180 \text{ fs}^2$ na cavidade óptica, que pode alargar o pulso temporalmente ou até mesmo impedir seu surgimento. Para a criação de condições favoráveis ao regime pulsado, precisa-se inserir outros elementos com dispersão negativa, para que a dispersão total intracavidade torne-se negativa ou zero.

Uma maneira de compensar a dispersão intracavidade é a utilização de espelhos com compensação de varredura (espelhos *chirped*s). Estes espelhos são formados por até 50 camadas dielétricas, onde cada comprimento de onda é refletido em uma camada diferente, criando um caminho óptico diferente para cada um deles (Figura 7).

Figura 7: Esquema de um espelho de varredura utilizado para substituir ou complementar a atuação dos pares de prisma.



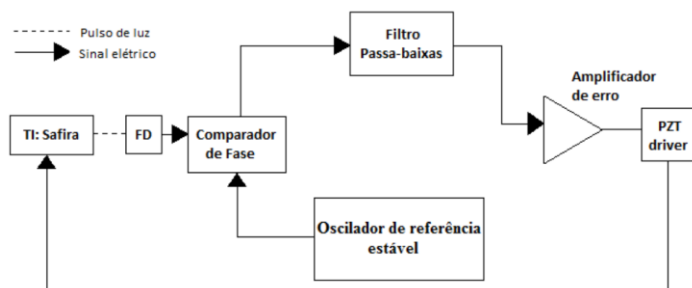
Fonte: Nogueira (2007)

Sistema de estabilização para o laser Ti:safira

O laser montado neste projeto tem como finalidade seu uso em metrologia como um instrumento de medida de alta precisão de tempo e frequência. Para que isso seja possível é necessário estabilizar sua taxa de repetição em frequência, utilizando-se um sistema com retroalimentação ativa, que compara a frequência de repetição do laser detectada por um fotodetector rápido com um oscilador de referência. O sinal resultante desta comparação passa por um circuito de controle e em seguida é enviado para o laser de Ti:safira, que estabiliza a taxa de repetição do laser, variando o tamanho da sua cavidade óptica. Este circuito de controle é composto por: comparador de fase,

filtro passa-baixa, amplificador de erro e um oscilador controlado por tensão, como mostra a Figura 8.

Figura 8: Esquema de estabilização da frequência de repetição do laser com retroalimentação *Phase Locked Loop* – PLL.



Fonte: Nogueira (2007).

O sinal da frequência de repetição do Ti:safira é comparado com a frequência de um oscilador de referência, gerando um sinal de saída chamado de sinal de *erro*. Este sinal passa por filtros e amplificadores e corrige a frequência de repetição do laser para que esta se mantenha igual ao gerador de referência.

Comparador de fase: compara a frequência de repetição do Ti:safira com a de um oscilador de referência, gerando uma tensão de saída resultante da diferença de fase entre os sinais, chamada de sinal de erro;

- Filtro passa-baixa: a tensão de saída é filtrada pelo filtro passa-baixa, que elimina todas as componentes de alta frequência do sinal;

- Amplificador de erro: este é constituído por amplificadores operacionais e amplifica o sinal de saída do filtro.

- Oscilador de referência: é um oscilador estável que serve como parâmetro para a estabilização do laser.

- PZT driver: circuito que controla a cerâmica PZT dentro da cavidade óptica do laser, que permite alterações no tamanho da cavidade óptica da ordem de micrômetros.

Resultados e Discussões

O laser desenvolvido neste trabalho foi projetado para ser versátil, permitindo a sua adaptação para várias aplicações. Possui uma base que permite

ajustes de sua taxa de repetição de 500 MHz até 2 GHz, alterando-se a distância entre os espelhos planos. Isso permite, por exemplo, mudar a intensidade de pico ou alterar a quantidade de modos longitudinais oscilando na cavidade. A versatilidade da cavidade permite também a inserção de novos elementos ópticos, como prismas e espelhos de varredura adicionais, para um maior controle da dispersão interna e para permitir a sintonia em comprimento de onda do feixe de saída. Foi montado, inicialmente, com cavidade no formato de anel, sendo dois planos e dois convexos de 3 cm de raio de curvatura, conforme a Figura 10 com quatro espelhos. Todos os espelhos são de varredura, produzindo uma dispersão interna total negativa. Utiliza-se como meio de ganho o cristal de Ti:safira de 3mm de espessura, e um laser de Nd:YAG dobrado em frequência de 5W de potência como fonte de energia externa.

A cavidade encontra-se vazia até o momento, não possuindo nenhum elemento além dos espelhos e do cristal. Elementos intracavidade como prismas para regime pulsado e *etalon*, diodo óptico, entre outros, para uma eventual oscilação em regime contínuo, podem ser adicionados posteriormente.

Os números típicos para o laser de Ti:safira construído neste trabalho são:

- $\lambda = 780 \text{ nm}$ (comprimento de onda central);
- $w = 10 \text{ }\mu\text{m}$ (cintura do feixe do laser no centro do cristal);
- $P_{\text{média}} = 800 \text{ mW}$ (potência média do feixe de saída do laser) e 40W (dentro da cavidade);
- Largura temporal estimada = 90 fs.

Figura 9: à direita: Cavidade construída em formato de anel. E1 e E2: espelhos com raio de curvatura de 3 cm; E3: espelho plano; E4: espelho de saída; $d3 = 5 \text{ cm}$; $d4 = 7 \text{ cm}$; $d = d1 + d2$. À esquerda: desenho em Autocad da cavidade óptica

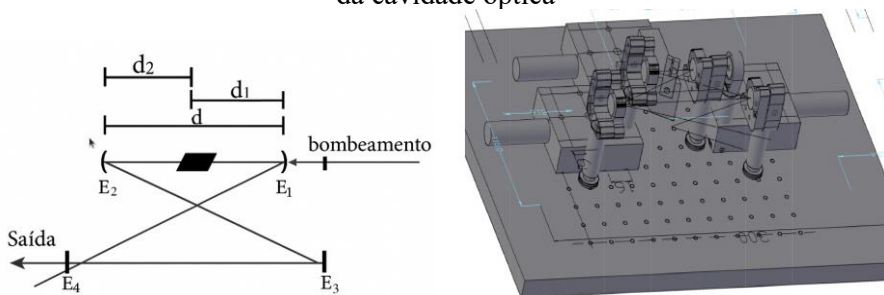
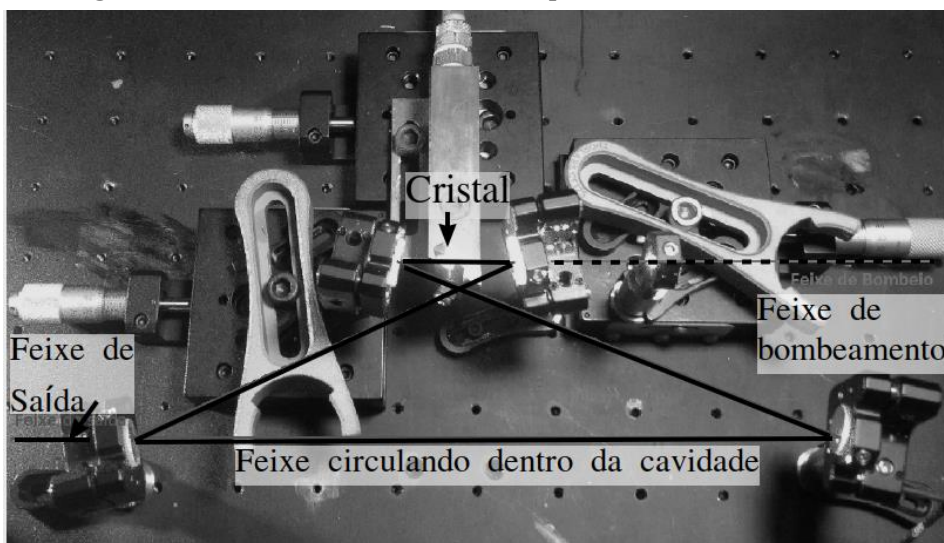


Figura: acervo das autoras.

A Figura 10 mostra uma fotografia do laser desenvolvido aqui. Podemos ver ao fundo uma base metálica projetada em Autocad 3D (conforme a Figura 0 à esquerda), com furações onde suportes para os componentes ópticos são fixados. Os suportes para lente de entrada, um dos espelhos curvos e o cristal de Ti:safira encontram-se em cima de estágios de translação micrométricos que permitem um posicionamento com precisão de décimo de milímetro.

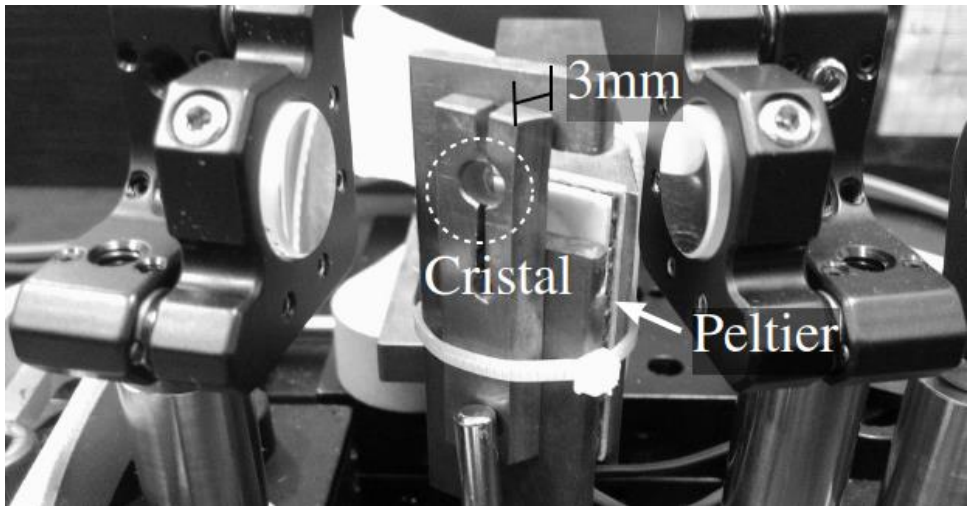
Figura 10: Laser de Ti:safira bombeado por um Laser de Nd:YAG.



Fonte: acervo das autoras.

O cristal foi montado em uma estrutura de latão associada a um peltier e a um trocador de calor, para dissipar o calor no cristal (Figura 11). O Peltier é um dispositivo cerâmico que transfere calor de uma de suas faces e para a outra face, dependendo da passagem de corrente elétrica, permitindo o controle da temperatura do cristal.

Figura 11: Montagem do laser de Ti:safira com o controlador de temperatura

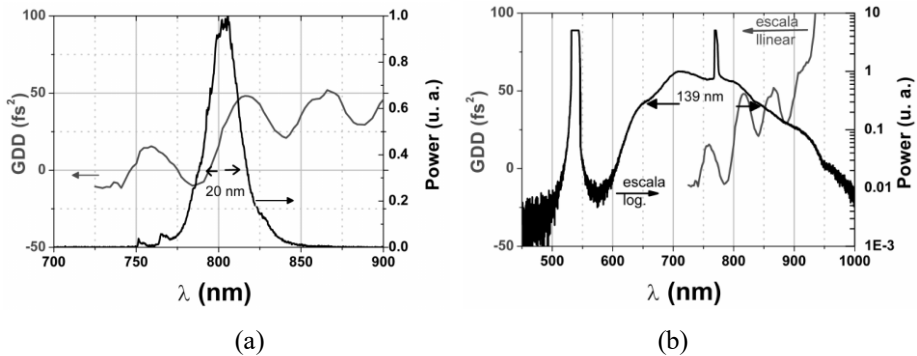


Fonte: acervo das autoras.

Caracterização do sistema

A Figura 12 mostra dois gráficos do espectro emitido no regime pulsado (eixo vertical à esquerda de cada gráfico) e a curva da dispersão da cavidade calculada com dados fornecidos pelo fabricante dos espelhos (eixo vertical à direita de cada gráfico), em duas situações. Na primeira, (Figura 12 (a)) o cristal de Ti:safira foi resfriado apenas com um trocador de calor e um *chiller*, chegando à temperatura de 50°. O gráfico à direita (Figura 12 (b)) mostra o espectro do laser quando o cristal foi resfriado utilizando o *peltier*. Neste caso, a temperatura do cristal foi estabilizada em 24° C.

Figura 12: escala à esquerda de cada gráfico: Dispersão da velocidade de grupo intracavidade do laser de Ti:safira; eixo vertical à direita de cada gráfico: espectro do feixe de saída para 4 W de potência de bombeamento na entrada do laser e 1 GHz de taxa de repetição. (a) cristal sem controle de temperatura (b) com controle de temperatura.



Fonte: acervo das autoras.

Podemos observar primeiramente que o controle de temperatura permitiu a ampliação da largura espectral de 20 nm para 139 nm. Também observamos que o espectro do laser com largura de 20 nm foi obtido na região positiva da curva de dispersão intracavidade. Uma possibilidade é que a temperatura de 50°C do cristal possa ter modificado a estrutura de dispersão do cristal permitindo a formação e propagação estável do pulso. Outra possibilidade é que a dispersão real dos espelhos seja diferente da dispersão calculada fornecida pelo fabricante. Para o melhor entendimento do processo de formação de pulso neste sistema, será a caracterização da dispersão dos espelhos e dos cristais por interferometria de luz branca.

O controle de temperatura do cristal também impactou na potência média de saída do laser, sendo de 710 mW quando o cristal alcançou 50°C e de 1100 mW com a temperatura do cristal estabilizada em 24°C, com 4 W de bombeamento em ambos os casos.

Sistema de estabilização em frequência

Para a estabilização do laser em frequência, o sistema conta com um *loop filter* comercial (Figura 13), contendo um comparador de fase, filtro passa-baixa e amplificador de erro. Esse equipamento é responsável por realizar a comparação da frequência de repetição do laser à um gerador de referência.

Figura 13: Loop Filter da *Stanford Research Systems*.

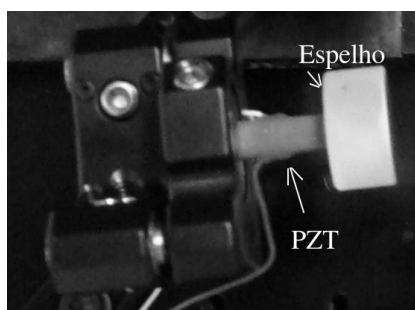


Fonte: acervo das autoras.

O sinal de saída do *Loop Filter* é utilizado para a correção de frequência, alterando a posição de um dos espelhos planos. Para isso, este espelho foi montado sobre uma cerâmica piezoelétrica (Figura 14), a qual sofre uma expansão em seu comprimento da ordem de micrômetros conforme aplicada um sinal elétrico da ordem de 50V.

O circuito que controla esta cerâmica, o PZT driver, que amplifica a saída do *Loop Filter* para valores da ordem de 50V, foi projetado e montado neste projeto com componentes de menor valor em comparação com outros circuitos comerciais.

Figura 14: Cerâmica PZT conectada ao espelho



Fonte: acervo das autoras.

Como osciladores de referência, testamos um Oscilador controlado por tensão de baixo custo (*VCO - Minicircuits POS-100*), com sintonia entre 50 e 100 MHz (Figura 15) e um gerador de função comercial de alta precisão e estabilidade *DS325 – Stanford Research Systems*.

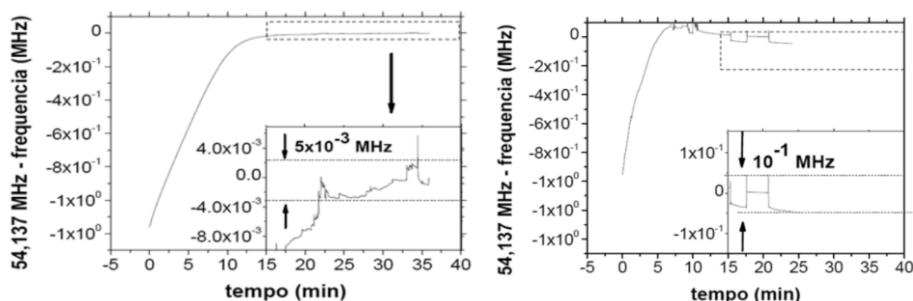
Figura 15: à esquerda: oscilador controlado por tensão (VCO - minicircuits POS-100), com sintonia entre 50 e 100 MHz, controlado por fonte de tensão comercial comum; à direita: gerador de função comercial de precisão DS325.



Fonte: acervo das autoras.

A Figura 16 mostra a curva de estabilidade para o CO - *Minicircuits* POS-100. À esquerda, o oscilador foi caracterizado sem qualquer filtro de ruído. Nota-se que a frequência deste componente demora cerca de 7 minutos para se estabilizar e depois apresenta um ruído de 10^{-1} M Hz. Acrescentando-se um capacitor de 300 mF na saída da fonte de alimentação do oscilador como um filtro de ruído, observemos uma melhora nos ruídos passando para valores de 5×10^{-3} MHz como mostrado na Figura 17 à direita. Entretanto, o tempo para estabilização em frequência aumentou para 15 minutos. A comparação entre o ruído e o valor da frequência central produz uma relação sinal/ruído da ordem de 10^{-2} e 10^{-4} , respectivamente.

Figura 16: Curva de estabilidade alcançada para o oscilador controlado por tensão (VCO - minicircuits POS-100) sem o capacitor (à esquerda) e com um capacitor de 300 mF (à direita) na saída da fonte de alimentação.

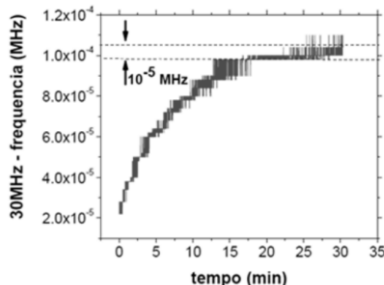


Fonte: acervo das autoras.

A Figura 17 mostra o ruído da frequência de saída para o gerador de função DS325. Neste caso, o gerador leva em torno de 20 minutos para

estabilização. Entretanto, o ruído em torno da frequência central (30 MHz) é de 10^{-5} MHz, duas ordens de grandezas menor que o melhor resultado para o VCO - Minicircuits POS-100). Neste caso, a comparação entre o ruído e o valor da frequência central produz uma relação sinal/ruído da ordem de 10^{-6} .

Figura 17: DS325: gerador de função comercial de precisão.



Fonte: acervo das autoras.

Conclusão

Foi desenvolvido um laser de Ti:safira para estudar a geração de espectro supercontínuo diretamente por lasers de femtossegundos e para aplicações em metrologia de tempo e frequência. A cavidade foi projetada para permitir a adição de um prisma para ajuste de sintonia ou inserção gradual de dispersão negativa, proporcionando versatilidade para produzir um espectro usual, de poucas dezenas de nanômetros de largura até um espectro supercontínuo, de cerca de 500 nm de largura.

A montagem mecânica da cavidade permite alterar a frequência de repetição de 500 MHz até 2 GHz. Esta variação da frequência de repetição altera a intensidade de pico dos pulsos e a distância entre os modos do laser, ampliando a sua gama de aplicações. Dependendo da quantidade de dispersão que se quer colocar na cavidade, pode-se inserir 2 ou 4 espelhos planos de varredura ou adicionar prismas. Esta versatilidade foi possível graças ao projeto mecânico da base do laser, projetada em AutoCAD e usinada em alumínio anodizado, com furações que permitem a adição de novos elementos ópticos e a modificação da posição dos elementos ópticos dentro da cavidade.

A escolha dos elementos ópticos foi feita para obter inicialmente uma dispersão intracavidade próxima de zero. Estudos na literatura indicam que cavidades com dispersão negativa possuem espectro com largura temporal de

poucos nanômetros, enquanto cavidades com dispersão próxima de zero produzem o supercontínuo.

Como este laser será utilizado na área de metrologia de tempo e frequência, faz-se necessário estabilizá-lo. Para isto mostrou-se um sistema retroalimentado de estabilização PLL (Phase Locked Loop). A primeira parte apresentada foi o *Loop Filter*, comprado comercialmente e utilizado como o comparador de fase, filtro passa-baixas e amplificador de erro. A segunda foi o circuito PZT driver, que ainda se encontra em fase de teste. A última parte foi o teste de ruído de dois osciladores de referência. Com o oscilador VCO - Minicircuits POS-100, de baixo custo, conseguimos uma relação sinal ruído de 10^{-4} e tempo para estabilidade de 7 minutos. Com um gerador de função de alta precisão DS325, obtivemos uma relação de sinal ruído da ordem de 10^{-6} . Ambos os osciladores são adequados para a estabilização ativa do laser de femtossegundos. A escolha depende da aplicação e da relação de custo/benefício entre simplicidade associada a baixo custo contra alta precisão.

O laser montado ainda não reproduziu o espectro supercontínuo com 500 nm de largura, mas obteve valores significativos, chegando a 139 nm. O motivo provável para este alargamento não ter ocorrido é a dispersão intracavidade ligeiramente positiva (Nogueira, 2006). Uma alternativa para encontrar o espectro de forma desejada é a adição de um prisma para ajuste de sintonia ou inserção gradual de dispersão negativa para ajudar na compensação da dispersão positiva imposta pelo cristal.

Os resultados deste trabalho foram apresentados em 14 eventos, recebendo premiações em três deles. Destas premiações, duas foram pela UFJF (2013 e 2014) nos Seminários de Iniciação Científica (SEMIC) na área de Ciências Exatas e uma de melhor poster no Simpósio de Lasers e suas aplicações na UFPE (2013). Uma e a participação do encontro anual da SBPC, com resumo estendido publicado na reunião anual da SBPC (Silva et al. (2014)).

Referências Bibliográficas

Bagnato, V. S. Os fundamentos da luz laser. **Física na Escola**, v.2, p. 1–9, 2001.

Cruz, C. H. B.; Fragnito, H. L. **Fenômenos Ultrarápidos: Geração de Pulsos Laser Ultracurtos e Suas Aplicações**. Universidade Estadual de Campinas, 2000.

Carlos Eliécer Estupiñan Lopez. **Teoria para Espectroscopia Direta com Pente de Frequências**; 2008; Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Pernambuco.

Nogueira, G. T.; da Cruz, F. C. Efficient 1 GHz Ti:sapphire laser with improved broadband continuum in the infrared. **Opt. Lett.**, v.31(13), p. 2069–2071, 2006.

Nogueira, G. T. **Desenvolvimento de pentes de frequências ópticas para metrologia e espectroscopia de precisão**. 2007. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas.

Nogueira, G. T.; da Cruz, F. C. Optical frequency comb for high-resolution and precision metrology. In: **Microwave and Optoelectronics Conference International, v.IMOC 2007, SBMO/IEEE MTT-S International**, p. p. 644–647, 2007.

Optical Engineering. **Short history of laser development**. Disponível em: opticalengineering.spiedigitallibrary.org/mobile/article.aspx?articleid=1096436#MakingDiodeLasersPractical. Acesso em 20 de Maio 2015.

Pinto, V. P.; Nogueira, G. T.; Yasuoka, F. M. M.; Castro Neto, J. C.. Experimental Guide for Compact Bow-Tie Femtosecond Solid-State Laser Development. **Photonics**, v. 12, p. 548, 2025.

Seara da Ciência. **Um pouco da história do laser**. Disponível em: <https://seara.ufc.br/pt/producoes/nossas-producoes-e-colaboracoes/secoes-especiais-de-ciencia-e-tecnologia/secoes-especiais-fisica/lasers/>. Acesso em 09 de out. 2025.

Silva, G. A. A história do laser e suas aplicações. **REUNIÃO REGIONAL DA SBPC**. (2010) Disponível em: www.sbpcnet.org.br/livro/boavista/resumos/1371.htm. Acesso em 09 de outubro de 2025.

Silva, C. A. **Analizador de espectro de baixo custo com frequência de operação entre 2 e 3 ghz, 2012**. Dissertação de Mestrado; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Silva, I. L.; Antunes, N.; Gonçalves, D.; Nogueira, G. T.; Desenvolvimento de um laser de ti:safira de femtossegundos com controle de dispersão intracavidade. **66ª Reunião Anual da SBPC** (2014). Disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/66ra/resumos/resumos/7492.htm>. Acesso em 09 de out. 2025.

Silva, I. L. , **Espectroscopia óptica do cristal de Safira dopado com íons de Titânio (Ti3+) para aplicação em cavidades ópticas**, Dissertação de Mestrado, UFJF, Juiz de Fora, 2017.

5- Determinação da variação do índice de refração da água em função de sua temperatura utilizando o interferômetro de Michelson

Luiz Antônio Silva de Oliveira¹⁸

Wallon Anderson Tadaiesky Nogueira¹⁹

Ivan Ferreira dos Santos²⁰

1 – Introdução, Motivação e Objetivos

O Laboratório de Inovação e Física Aplicada (LIFA) da UFJF tem desenvolvido pesquisas voltadas à aplicação de técnicas interferométricas em medições que requerem alta sensibilidade. Medições cuidadosas de variações de índices de refração são importantes para se obter informações de parâmetros físicos de meios que se modificam em função de um parâmetro que se pode controlar e que tem sentido físico para a compreensão da natureza ou para alguma aplicação tecnológica. Um exemplo interessante é a proposta de se monitorar populações de bactérias em razão da aplicação de drogas específicas. Nesse sentido, o índice de refração do meio em que se encontra a bactéria sofre variação devido à produção de compostos resultantes de sua atividade metabólica (R. R. P. Machado *et al.*, 2008; R. R. P. Machado *et al.*, 2012; R. R. P. Machado *et al.*, 2015).

Neste trabalho, investigamos a variação do índice de refração da água por meio do uso de interferometria. Mais especificamente, por meio do uso de um interferômetro do tipo Michelson (Michelson & Morley, 1887). Este trabalho permitiu o desenvolvimento de capacidades experimentais em interferometria e treinamento de estudantes, de modo que se possa dar

¹⁸ Bacharel em Ciências Exatas e Graduando em Física – Dep. de Física – UFJF - E-mail: luiztonim@gmail.com

¹⁹ Prof. Dep. de Física – UFJF E-mail: wallon.anderson@ufjf.br

²⁰ Prof. Dep. de Física – UFJF Email: ivan@ufjf.br

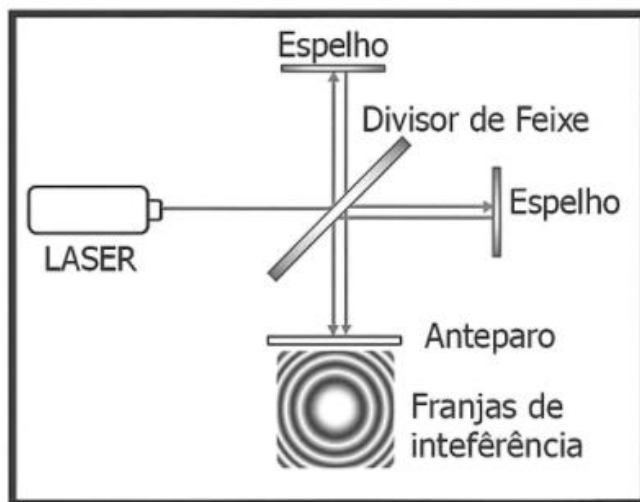
continuidade no estudo da evolução de populações bacterianas, assim como aplicar ao estudo de outros materiais líquidos de interesse no contexto das pesquisas tecnológicas do LIFA (Shikhar Mohan *et al.*, 2019; Sulaiman Khan *et al.* 2020; F. M. Aldosari *et al.*, 2024).

Este trabalho é organizado da seguinte forma. Na seção 2, apresentamos uma breve introdução ao Interferômetro Michelson, mostrando aspectos importantes de sua estrutura, funcionalidade e capacidade de medidas de significativa precisão. Na seção 3, apresentamos os resultados de Bashkatov & Genina (2003) para a variação do índice de refração da água. Na seção 4, apresentamos uma explicação de nossa montagem interferométrica para a obtenção da variação do índice de refração de líquidos transparentes. Na seção 5, explicamos como se pode converter a contagem de franjas de interferência que passam por um ponto específico de um anteparo em variação de fase e, portanto, em variação de índice de refração. Na seção 6, apresentamos os resultados experimentais para a água (comum, obtida em torneira) usada em nosso experimento. Finalmente, na seção 7, temos a seção de Conclusões.

2 - O interferômetro de Michelson

Esta seção é uma breve revisão do Interferômetro de Michelson. Conforme ilustrado na Figura 1, ele é constituído de dois espelhos e um divisor de feixe. Mas certamente, uma fonte de luz (laser) e um anteparo também são necessários. No anteparo, a luz proveniente dos dois espelhos se sobrepõe, formando um padrão de interferência composto por franjas claras e escuras. Este dispositivo foi inicialmente utilizado no final do século XIX para investigar a propagação da luz em um suposto meio universal, denominado éter (Michelson & Morley, 1887). Embora a existência desse meio tenha sido descartada, o interferômetro de Michelson permaneceu sendo empregado em outras aplicações. Atualmente, ele é um instrumento amplamente conhecido e utilizado, inclusive para fins didáticos (Nils Haverkamp *et al.*, 2020).

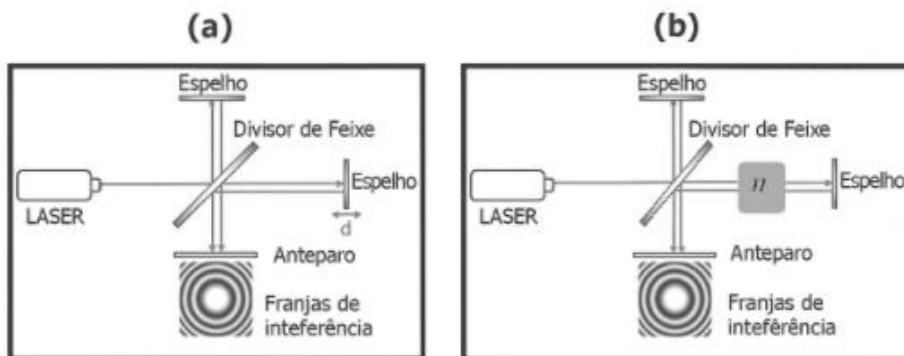
Figura 1: Interferômetro de Michelson, constituído basicamente de dois espelhos e um divisor de feixe.



Fonte: elaborado pelos autores.

Se uma diferença de caminho óptico (d) for introduzida entre os dois braços do interferômetro, as franjas deslocam-se proporcionalmente. Medindo-se esse deslocamento, é possível inferir a diferença de caminho óptico. Tal diferença pode ser gerada diretamente, deslocando-se um dos espelhos (Figura 2.a), ou inserindo um meio com índice de refração n em um dos braços (Figura 2.b). O primeiro procedimento é o mais comum e frequentemente utilizado para fins didáticos. Este capítulo aborda o segundo caso, explorando adicionalmente a inserção de um meio cujo índice de refração varia em função de sua temperatura.

Figura 2: Modificando a diferença de caminho óptico entre os dois braços por dois métodos distintos: (a) deslocando um dos espelhos ou (b) adicionando um meio com índice de refração n



Fonte: elaborado pelos autores.

Os comprimentos dos braços do interferômetro não precisam ser iguais para que existam franjas, basta que a diferença entre eles não seja superior ao comprimento de coerência do laser, mas isto frequentemente não ocorre. A diferença de comprimento entre os braços, afeta as posições relativas das franjas no anteparo. Em particular, se um dos espelhos se desloca de uma distância igual a meio comprimento de onda, as franjas claras se tornam escuras e vice-versa. Se este espelho mover um comprimento de onda inteiro as franjas voltam à configuração inicial. Este procedimento é mais comumente usado para fins didáticos e está ilustrado na Figura 2.a. Como o comprimento de onda da luz visível é apenas algumas frações do micron, este dispositivo é útil para medir variações de posições desta ordem. Por exemplo, se o espelho empurrar um objeto enquanto move, é possível saber o quanto o objeto se moveu observando a variação das franjas no anteparo.

De uma forma geral, para que haja mudança nas posições relativas das franjas, é necessário haver variação na diferença de número de comprimentos de ondas percorridos pelos dois feixes. Por exemplo, se por qualquer motivo, a diferença de caminho óptico entre os dois braços mudar de $3,7\lambda$ para $3,5\lambda$, isto vai se traduzir numa mudança na configuração das franjas. Mas se esta mudança for de $3,7\lambda$ para $2,7\lambda$, isto só ocasionará mudanças temporárias no padrão de franjas (enquanto a mudança estiver ocorrendo), pois uma diferença de exatamente um comprimento de onda faz o padrão de interferência retornar à situação inicial. Já foi dito, mas vale enfatizar: para que um dos braços tenha

um caminho óptico maior, ele não precisa ser mais longo, basta que caibam mais comprimentos de ondas nele. Este trabalho explora essa possibilidade, variando continuamente a temperatura do meio em um dos braços, altera-se o índice de refração desse meio, mudando a quantidade de comprimentos de onda contida nele e, por consequência, a diferença de caminho óptico entre os dois braços.

É importante observar que durante a aquisição dos dados, um interferômetro está sempre sujeito a pequenas instabilidades mecânicas que introduzem erros intrínsecos ao aparato experimental. Embora tais instabilidades possam ser mitigadas, sempre permanece um nível residual inevitável. Na etapa de tratamento dos dados, a contagem de franjas de interferência constitui uma fonte adicional de erro acumulativo, característica de procedimentos baseados em contagem, nos quais as incertezas individuais se somam ao longo do processo. Esses dois tipos de erro não podem ser facilmente dissociados e nem há necessidade prática de fazê-lo. Assim, o presente trabalho tem por objetivo estimar o erro global resultante da combinação de ambos.

O agente responsável pela variação das franjas — e, portanto, pela possibilidade de contagem — pode ter diferentes naturezas. Essa variação pode ser provocada pelo deslocamento de um dos espelhos do interferômetro ou pela alteração do índice de refração em um de seus braços, decorrente, por exemplo, de mudanças de temperatura, composição química, pressão ou dilatação do meio. Independentemente do agente causador, todos esses casos têm em comum o uso do interferômetro e o processo de contagem de franjas. Dessa forma, para a estimativa do erro global associado à técnica, o fator responsável pela variação é de importância secundária. Neste trabalho, optou-se por utilizar a variação da temperatura da água como agente de modulação, uma vez que há na literatura dados confiáveis sobre o índice de refração da água em função da temperatura, os quais foram utilizados como referência para a estimativa do erro total da técnica (Bashkatov & Genina, 2003).

3 - Valores reportados na literatura

Esta seção é um resumo de Bashkatov & Genina, (2003), que obtêm a seguinte expressão para o índice de refração da água em função da temperatura

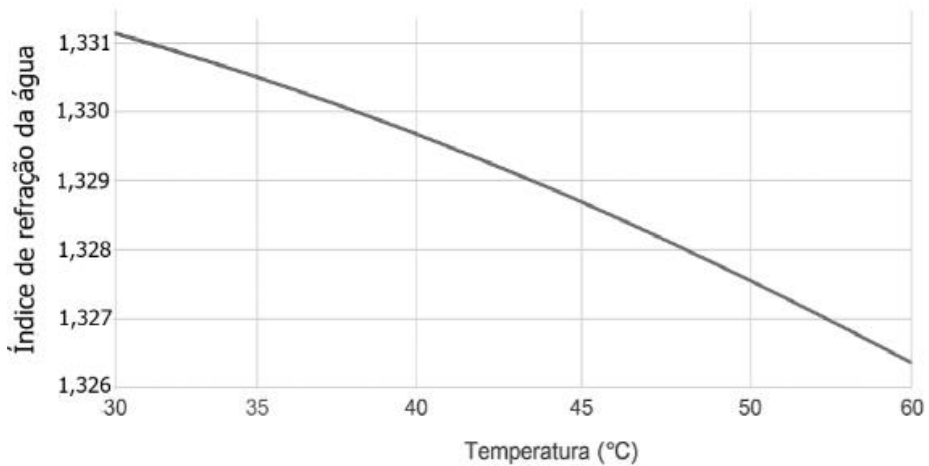
$$n(\lambda, T) = A(T) + \frac{B(T)}{\lambda^2} + \frac{C(T)}{\lambda^4} + \frac{D(T)}{\lambda^6}, \quad (1)$$

onde λ é o comprimento de onda luz, e os *coeficientes de cauchy* obtidos são

$$\begin{aligned} A(T) &= 1.3208 - 1.2325 \times 10^{-5}T - 1.8674 \times 10^{-6}T^2 + 5.0233 \times 10^{-9}T^3 \\ B(T) &= 5208.2413 - 0.5179T - 2.284 \times 10^{-2}T^2 + 6.9608 \times 10^{-5}T^3 \\ C(T) &= -2.551 \times 10^8 - 18341.336T - 917.2319T^2 + 2.7729T^3 \\ D(T) &= 9.3495 + 1.7855 \times 10^{-3}T + 3.6733 \times 10^{-5}T^2 - 1.2932 \times 10^{-7}T^3 \end{aligned} \quad (2)$$

Usando os coeficientes mostrados em (2) e o comprimento de onda $\lambda = 632 \text{ nm}$ (do laser HeNe usado neste trabalho), obtém-se o gráfico da Figura 3.

Figura 3: Curva obtida da Equação 1, com os coeficientes de Cauchy da Equação 2 e $\lambda = 632 \text{ nm}$ – comprimento de onda usado neste trabalho.



Fonte: elaborado pelos autores.

4 - O experimento

A montagem experimental está esquematizada na Figura 4 e fotografada na Figura 5.a. Trata-se de uma realização da configuração idealizada mostrada na Figura 2.b. Neste experimento, o recipiente utilizado para armazenar água foi um pequeno aquário de vidro, com volume interno de aproximadamente *1 litro*. Adicionalmente, foram utilizados um termômetro (analógico com precisão de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$) e duas câmeras (de telefones celulares). O laser usado foi do tipo HeNe (com $\lambda = 632\text{ nm}$) e o divisor de Feixe do tipo cubo não polarizador. A parede do laboratório foi utilizada como anteparo. Nela, foi fixada uma pequena chave Allen com o objetivo de fornecer uma noção de escala do padrão observado. Uma das quinas da ferramenta serviu como ponto de referência para facilitar a contagem das franjas e acompanhar a variação do padrão. Uma lente de foco *10 cm* foi inserida entre o divisor de feixe e o anteparo apenas para aumentar o tamanho do padrão facilitando sua visualização. As distâncias envolvidas nessa montagem estão listadas na Tabela 1.

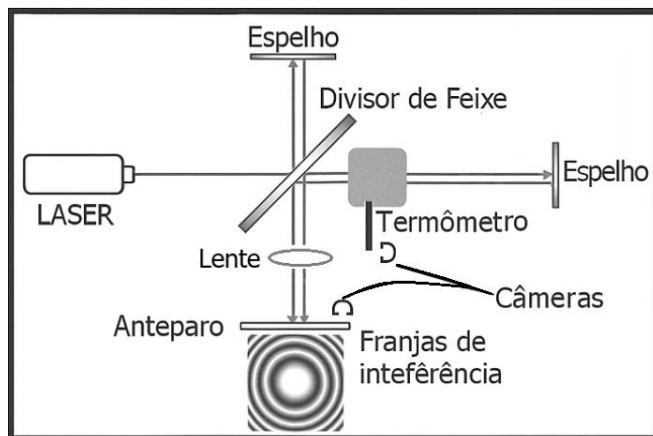
Exceto o anteparo, todo equipamento foi preso sobre uma mesa óptica sem nenhum mecanismo pneumático de estabilização mecânica.

Tabela 1: distâncias envolvidas na montagem experimental.

Percurso	Dimensão (cm)
Da fonte (laser) ao divisor de feixe	(107 ± 2)
Do divisor ao espelho (do braço com água)	(21 ± 1)
Do divisor ao espelho (do braço sem água)	(7 ± 1)
Do divisor à lente	(48 ± 1)
Da lente ao anteparo	(180 ± 10)
Comprimento do aquário	$(14,0 \pm 0,5)$
Espessura do vidro do aquário	$(0,30 \pm 0,05)$

Fonte: próprio autor

Figura 4: Esquema da montagem experimental. O feixe é injetado no interferômetro contendo um aquário com água e termômetro, sendo projetado no anteparo por meio de uma lente. Duas câmeras registram, simultaneamente, a leitura do termômetro e as franjas no anteparo.



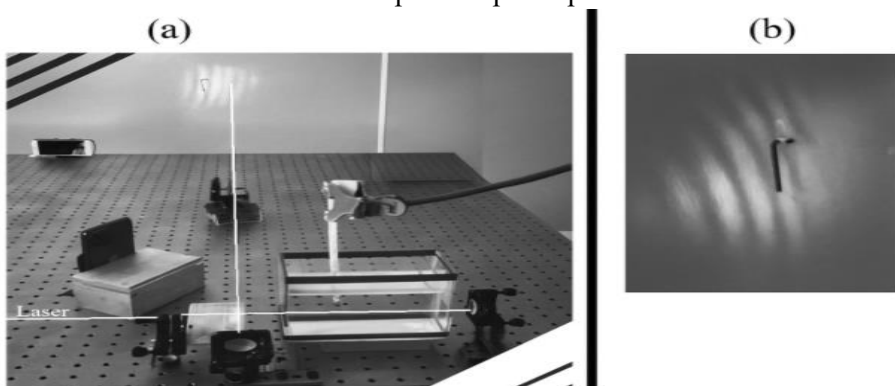
Fonte: elaborado pelos autores.

Neste experimento, não é necessário que o interferômetro esteja perfeitamente alinhado, apresentando franjas circulares bem definidas. É suficiente que o padrão de interferência seja visível (como mostrado na Figura 5.b). Isso é possível porque apenas um ponto do padrão é observado, não importando a geometria de sua totalidade. Um alinhamento excessivamente preciso pode, até mesmo, ser prejudicial, pois torna as posições das franjas instáveis em razão de pequenas vibrações mecânicas. Nessa condição, as franjas alternam lenta e periodicamente entre regiões claras e escuras, independentemente de quaisquer variações de temperatura na água. Esse comportamento foi verificado experimentalmente neste trabalho. O período médio dessas oscilações espúrias situou-se entre 30 e 60 segundos. Caso fosse superior a quatro horas — duração total do experimento — não haveria qualquer influência nos resultados.

O alinhamento do interferômetro é realizado inicialmente sem o aquário e sem a lente. Cada elemento óptico é inserido de modo que o feixe refletido por ele retorne aproximadamente sobre si mesmo. É essencial que os feixes provenientes de ambos os espelhos se sobreponham no divisor de feixe e no anteparo. Seguindo esse procedimento, as primeiras franjas surgem naturalmente no anteparo, ainda que de difícil visualização. Em seguida,

adiciona-se a lente, o que amplia o padrão e permite realizar o ajuste fino por meio de pequenas correções nos ângulos dos espelhos, até que as franjas se tornem mais nítidas. As franjas não precisam necessariamente aparecer na posição diagonal, como mostrado na Figura 5.b; essa orientação ocorreu de forma aleatória. Depois disto, acrescentou-se o aquário, com água pré aquecida à temperatura de aproximadamente $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Essa inserção pode distorcer significativamente o padrão já obtido, mas ele é restaurado mediante a reajustes leves no ângulo do espelho correspondente ao braço no qual foi acrescentada a água.

Figura 5: (a) Fotografia da montagem experimental. O feixe é injetado no interferômetro contendo um aquário com água e termômetro, sendo projetado na parede por meio de uma lente. (b) Fotografia das franjas de interferência. Uma chave Allen foi fixada à parede apenas para referência de escala.

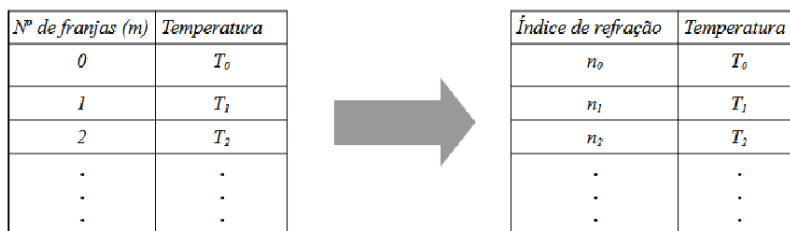


Fonte: elaborado pelos autores.

Após o alinhamento inicial já descrito, deixou-se a água resfriar naturalmente. No início do resfriamento, as duas câmeras foram ativadas simultaneamente: uma para filmar o anteparo e outra registrando o termômetro. Isto produziu dois vídeos com durações aproximadas de 4 horas. Em temperaturas muito altas, as franjas não apenas se deslocavam, mas apresentavam distorções significativas devido à convecção térmica, dificultando suas contagens. Por isto, todas as partes dos vídeos correspondentes às temperaturas superiores a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ foram descartadas. Assim, em toda análise posterior, este foi considerado o instante inicial, com temperatura inicial $T_0 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, quando começa a contagem de franjas ($m = 0$).

Para cada instante subsequente, é possível determinar, a partir dos vídeos, a temperatura e a configuração das franjas no anteparo. Não é necessário acompanhar o padrão de interferência completo, basta observar um ponto fixo qualquer. Neste ponto, uma franja inicialmente clara escurece e volta a ficar completamente clara, o que corresponde a uma passagem de franja ($m = 1$), e temperatura T_1 . À medida que a água esfria, o mesmo ponto apresenta novamente a sequência escurecer–clarear, gerando $m = 2$ e temperatura T_2 e assim sucessivamente. Dessa forma, para cada instante em que a franja está totalmente clara, obtém-se um par (m, T_m) . Este par deve ser convertido em (n, T_m) , pois a literatura fornece o índice de refração como função da temperatura (Bashkatov & Genina, 2003). A conversão é ilustrada na Figura 6 e será detalhada na seção seguinte.

Figura 6: Conversão da contagem de franjas em variação do índice de refração. À esquerda, modelo de tabela de medidas experimentais; à direita, modelo de tabela empregada na elaboração do gráfico.



Fonte: elaborado pelos autores.

5 - Convertendo contagem de franjas em variação do índice de refração

No experimento, conta-se o número de franjas (m) e, para cada uma delas, registra-se a temperatura T_m , obtendo-se, assim $m(T_m)$. Entretanto, a literatura fornece o índice de refração como função da temperatura, $n(T)$ (veja Figura 3); portanto, é necessário mapear m em n .

Sempre que for possível variar a diferença de caminho óptico d entre os braços do interferômetro, a intensidade luminosa em um dado ponto do anteparo é dada por (Fowles, 1989)

$$I(d) = \text{const} \times \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \right] \quad (3)$$

Nota-se que esta expressão tem periodicidade λ pois para $d = \lambda, 2\lambda, 3\lambda$ ela fornece sempre o mesmo valor. No experimento em questão, o caminho óptico d é função da temperatura, logo $d = d(T)$. Além disto, levando em conta que o valor do cosseno não se altera se uma fase $2m\pi$ (com m inteiro) for adicionada em seu argumento e que o valor máximo de $I(T)$ é $I_{\max}$ (mensurável), pode-se reescrever a Equação (3) como

$$I(T) = \frac{I_{\max}}{2} \times \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi d(T)}{\lambda} - 2m\pi\right) \right] \quad (4)$$

O caminho óptico percorrido pela luz é a distância percorrida multiplicada pelo índice de refração do meio. Desta forma,

$$d(T) = 2[2\epsilon n_v(T) + n(T)L + (A - L - 2\epsilon)n_{ar}(T) - Bn_{ar}(T)] \quad (5)$$

Nesta expressão n_v é o índice de refração do vidro (do aquário), ϵ é sua espessura, L é o comprimento do aquário, n_{ar} é o índice de refração do ar e as constantes A e B são os comprimentos dos braços do interferômetro. O fator 2 fora dos colchetes é devido ao fato da luz passar duas vezes por cada braço, na ida e na volta. Inserindo a Equação (5) em na Equação (4) e isolando $n(T)$ obtêm-se

$$n(T) = \cos^{-1}\left(\frac{I(T) - I_{\max}/2}{I_{\max}/2}\right) \frac{\lambda}{4\pi L} - \frac{D}{L} - \frac{2\epsilon n_v(T)}{L} - \frac{m\lambda}{2L} \quad (6)$$

A constante D é dada por $D = A - B - L - 2\epsilon$. Assumindo que o índice de refração do vidro não varia significativamente com a temperatura, ou seja,

$$n_v(T) = n_v(T_0) \quad (7)$$

e agrupando-se todos os parâmetros independentes da temperatura em uma única constante n_0 , obtêm-se

$$n(T) = n_0 + m \frac{\lambda}{2L} \quad (8)$$

onde a constante n_0 é dada por

$$n_0 = \frac{\lambda}{4\pi L} \cos^{-1} \left(\frac{2I_0}{I_{max}} - 1 \right) - \frac{D}{L} - \frac{2\epsilon}{L} n_v(T_0) \quad (9)$$

Nesta expressão, T_0 e I_0 são a temperatura e intensidade iniciais (para as quais se atribui $m = 0$). Apesar da aparente complexidade da Equação (9), nenhum dos parâmetros dela depende da temperatura. Logo, é apenas uma constante. Para calcular o índice de refração a partir da contagem de franjas (m), seria necessário conhecer todos esses parâmetros. Contudo, o objetivo deste trabalho é determinar apenas a **variação** do índice de refração a partir do valor inicial n_0 . Desta forma, o valor da constante n_0 torna-se irrelevante.

À primeira vista, pode parecer que não há dependência com a temperatura no lado direito da Equação (8). No entanto, essa dependência está implícita, pois o valor de m varia com a temperatura. Se a temperatura permanece constante, não ocorre deslocamento das franjas, e a contagem mantém-se em $m = 0$. Em outras palavras, $m = m(T)$.

6 - Resultados

Após converter o número de franjas (m) em índice de refração (n) pela Equação (8), os dados experimentais foram representados no gráfico da Figura 7. A linha contínua, reproduzida da Figura 3, corresponde aos valores obtidos na literatura (Handbook of Chemistry and Physics, 2000).

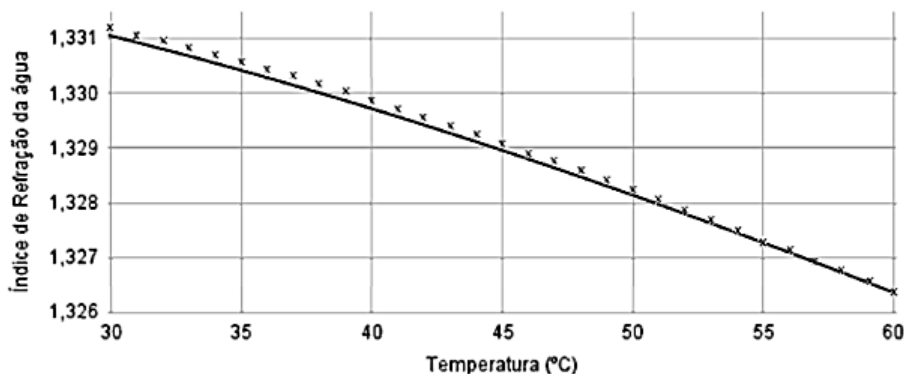
Na temperatura inicial (60 °C), o ponto experimental coincide com o valor encontrado na literatura (Handbook of Chemistry and Physics, 2000). Essa coincidência, entretanto, é artificial, pois o parâmetro n_0 foi ajustado de modo que $n(60 \text{ °C})$ coincida com o valor de referência. A partir desse ponto, avalia-se o desvio dos dados experimentais em relação àqueles registrados pela literatura enquanto a temperatura diminui.

No intervalo total de 30 °C a 60 °C, os valores experimentais obtidos em nosso experimento e os reportados pela literatura coincidem até a terceira casa decimal, divergindo apenas na quarta. Em faixas menores de temperatura (inferiores a aproximadamente 7 °C), a concordância estende-se também à

quarta casa decimal — como se observa entre 50 °C e 60 °C. Por outro lado, entre 30 °C e 40 °C, a concordância é menor. Ressalta-se, contudo, que se o experimento tivesse sido limitado a essa faixa, poderia ser adotado $n_0 = n(40\text{ °C})$, obtendo-se concordância semelhante à observada no intervalo superior. Essa escolha seria válida, uma vez que o interesse do presente trabalho recai sobre a **variação** do índice de refração em função da temperatura, e não sobre o valor absoluto de n em cada ponto.

Observa-se ainda que a discrepância aumenta à medida que a temperatura se afasta da referência (60 °C). Esse comportamento decorre do carácter acumulativo do erro associado à contagem. Assim, as discrepâncias refletem não apenas limitações do equipamento, mas também do próprio processo de contagem (tratamento de dados). Portanto, a incerteza na terceira ou quarta casa decimal (dependendo da faixa temperatura) deve ser associada ao conjunto interferômetro–contagem.

Figura 7: Comparação entre os dados experimentais obtidos neste trabalho e o resultado semiempírico do índice de refração da água reportado por Bashkatov & Genina (2003). Os símbolos $\times$ representam as medidas experimentais, e a linha contínua corresponde ao ajuste baseado na referência, coincidindo a 60 °C.



Fonte: elaborado pelos autores.

7 - Conclusão

Neste trabalho, mediu-se a variação do índice de refração da água em função da temperatura, de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, a menos de uma constante aditiva n_0 . A determinação do valor absoluto de $n(T)$, que exigiria conhecimento preciso de parâmetros como o índice de refração do vidro do recipiente, não foi realizada. Embora tais parâmetros possam ser avaliados em estudos futuros, optou-se por focar apenas na variação do índice, que é frequentemente o principal interesse, especialmente quando o valor inicial já é conhecido.

Ao longo de toda a faixa de temperatura examinada, os valores obtidos diferem dos reportados na literatura a partir da quarta casa decimal. Entretanto, em intervalos menores (cerca de $7\text{ }^{\circ}\text{C}$), os resultados coincidem com a literatura até essa mesma casa decimal.

Por fim, o desenvolvimento e a calibração desse equipamento permitirão que o LIFA, do Departamento de Física da UFJF, retome os estudos de caracterização dos efeitos de drogas em populações microbianas. Além disso, o sistema poderá ser utilizado na análise de variações do índice de refração em materiais transparentes de interesse científico e tecnológico, inicialmente em função da temperatura e, futuramente, de outros parâmetros relevantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Referências

Aldosari, F. M. et al. (2024). **Optical, Opto-Mechanical, and Antimicrobial Characterization of TiO₂ and ZnO-Enhanced Polypropylene Fibers Using Interferometric Techniques and Fourier Transform Analysis**. *Luminescence*, 2024; 39:e70067

Bashkatov, A. N., & Genina, E. A. (2003). Water refractive index in dependence on temperature and wavelength: A simple approximation. In V. V. Tuchin (Ed.), *Proceedings of the Saratov Fall Meeting 2002: Optical Technologies in Biophysics and Medicine IV* (Vol. 5068, pp. 393–395). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.518857>

Fowles, Grant R. (1989). **Introduction to modern optics**. 2nd ed. New York: Dover Publications c1975. 328 p. ISBN 0486659577

Index of refraction of water / Handbook of Chemistry and Physics, Eds. Lide D.R., CRC Press LLC, 2000-2001

Machado, R. R. P. et al. (2008). **Metabolic activity interferometer: description and calibration of an interferometric method to measure growth of mycobacteria**. *Eur. Biophys. J* (2008) 38:111–119, DOI 10.1007/s00249-008-0359-z

Machado, R. R. P. et al. (2012). **Metabolic Activity Interferometer: A Powerful Tool for Testing Antibiotics**. *Journal of Sensors*, Volume 2012, Article ID 493797, 7 pages doi:10.1155/2012/493797

Machado, R. R. P. et al. (2015). **Interferometry as a tool for evaluating effects of antimicrobial doses on Mycobacterium bovis growth**. *Tuberculosis* 95 (2015) 829-838

Michelson, A. A., & Morley, E. W. (1887). On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, 34(203), 333–345. <https://doi.org/10.2475/ajs.s3-34.203.333>

Nils Haverkamp et al. (2020). **Measuring Wavelengths with LEGO® Bricks: Building a Michelson Interferometer for Quantitative Experiments**. *Phys. Teach.* 58, 652 (2020); <https://doi.org/10.1119/10.0002734>

Shikhar Mohan et al. (2019). **Refractive Index Measurement of Pharmaceutical Solids: A Review of Measurement Methods and Pharmaceutical Applications**. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 108 (2019) 3478-3495

Sulaiman Khan et al. (2020). **A Review of Optical Interferometry Techniques for VOC Detection** *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, 2020, 302, pp.111782

6- Desenvolvimento e validação de sistema experimental aplicado no controle de vibrações de protótipo de edifício utilizando elementos de Liga com Memória de Forma (LMF)

Yuri José Oliveira Moraes²¹
Raphael Lima Miranda Gonçalves Fagundes²²
Bruno Santiago dos Santos Mendes²³

1. Resumo

O estudo desenvolve e valida um sistema de controle passivo de vibrações composto por duas bancadas, com custo total de R\$ 726,00. Os modelos analítico e numérico apresentaram boa concordância com os ensaios, com erros de até 6,48%. A aplicação de molas superelásticas de NiTi mostrou alta eficiência, destacando a mola M7 com 300% de *offset*, que reduziu em até 62% as amplitudes de vibração, comprovando o potencial das LMF no amortecimento passivo.

Palavras-chaves: *Vibrações Mecânicas, Ligas de Memória de Forma (LMF), Bancada Experimental, Método dos Elementos Finitos (MEF), Amortecimento Estrutural.*

²¹ Professor Doutor em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento Engenharia Mecânica.

E-mail: yurijmoraes@ufjf.br. <https://orcid.org/0000-0002-0819-3308>

²² Graduando em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Juiz de Fora.

E-mail: raphael.fagundes@estudante.ufjf.br. <https://orcid.org/0009-0004-1016-409X>

²³ Graduando em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Juiz de Fora.

E-mail: bruno.mendes@estudante.ufjf.br. <https://orcid.org/0009-0004-4182-3254>

2. Introdução

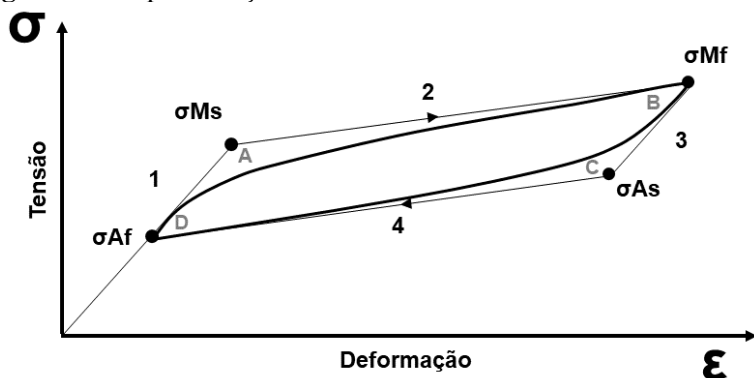
As vibrações mecânicas são fenômenos recorrentes em sistemas naturais e artificiais e podem variar desde pequenas amplitudes em máquinas do dia a dia até oscilações de grande intensidade causadas por ventos, terremotos ou ondas marítimas, capazes de provocar danos estruturais significativos. A análise da resposta dinâmica é, portanto, essencial para garantir desempenho, segurança e durabilidade de sistemas estruturais (Rao, 2008).

A resposta de uma estrutura a excitações externas depende de parâmetros fundamentais como massa, rigidez e amortecimento, e demanda estratégias de controle que reduzam deslocamentos e esforços indesejados.

As abordagens de controle podem ser classificadas como passivas, que dissipam energia sem a necessidade de fontes externas e se destacam pela robustez e baixo custo; ativas, que utilizam sensores e atuadores para aplicar forças contrárias à vibração, oferecendo maior eficiência em detrimento de uma maior complexidade; ou ainda semi-ativas e híbridas, que buscam um equilíbrio entre esses dois extremos (Soong e Spencer, 1999)

Entre as soluções passivas, as ligas com memória de forma (LMF), especialmente o NiTi (Nitinol), destacam-se por suas propriedades termomecânicas conhecidas como efeito memória de forma e superelasticidade. Essas características permitem grandes deformações reversíveis e uma significativa dissipação de energia por histerese. Para que essa dissipação seja efetiva, é comum a aplicação de uma pré-deformação inicial, ou *offset*, que posiciona o elemento de LMF em seu ponto ótimo de operação, garantindo a ativação do ciclo histerético e maximizando a absorção de energia a cada oscilação. Isso torna as LMF promissoras como elementos dissipativos em aplicações estruturais, com estudos demonstrando que essas ligas podem apresentar elevados fatores de perda dependentes de temperatura, amplitude e frequência de excitação (Oliveira, 2008).

Figura 11: Representação da curva de histerese mecânica de uma LMF.



Fonte: Adaptado de Song (2006).

Para investigar a aplicabilidade das LMF em controle passivo, este trabalho aborda o desenvolvimento de duas bancadas experimentais complementares. A primeira consiste em um pêndulo ajustável, projetado para fornecer impulsos iniciais controlados, enquanto a segunda é um pórtico estrutural de dois graus de liberdade, utilizado para avaliar o efeito dissipativo de molas ortodônticas de NiTi. Embora de baixo custo, ambos os protótipos foram concebidos para preservar a representatividade física do problema dinâmico, permitindo que os resultados experimentais validem os modelos numéricos e demonstrem o potencial das LMF como dispositivos passivos de controle em estruturas reais.

3. Revisão Bibliográfica

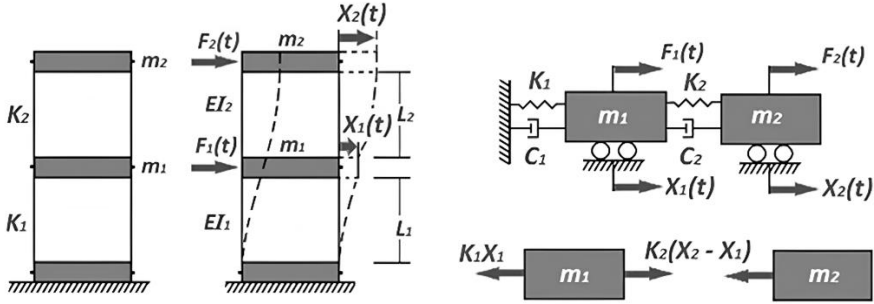
3.1. Propriedades de Vibração

Desde os trabalhos de Timoshenko (1940), a modelagem de vibrações evoluiu de sistemas simples de 1 grau de liberdade (GDL) para formulações complexas com múltiplos GDL, essenciais para prevenir ressonâncias e garantir a integridade estrutural. Sistemas com 2 GDL, por exemplo, podem ser representados por modelos simplificados, como o de massa-mola acoplado aplicado a estruturas de dois pavimentos, conforme ilustrado na Figura 2.

A prevenção da ressonância é um dos principais objetivos da análise vibratória. Esse fenômeno destrutivo ocorre quando a frequência de uma excitação externa se aproxima de uma das frequências naturais da estrutura,

resultando em um aumento descontrolado das amplitudes de oscilação que pode levar à falha catastrófica do sistema.

Figura 2: Sistema com 2 graus de liberdade massa-mola.



Fonte: Adaptado de Rao (2008).

O comportamento dinâmico de sistemas vibratórios pode ser descrito de forma unificada pela seguinte equação matricial de movimento (Inman, 2013; Meirovitch, 2001):

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\}, \quad (1)$$

A partir de simplificações desta equação, obtêm-se os principais casos de análise: vibração livre (amortecida ou não) e vibração forçada (amortecida ou não). A solução permite determinar as frequências naturais (ω_n) e os modos de vibração do sistema. Para um sistema com um único grau de liberdade, essa frequência é dada por (Den Hartog, 1985)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2)$$

Enquanto para múltiplos GDL é necessário resolver o problema de autovalores (Meirovitch, 2001; Clough e Penzien, 1993)

$$\det([K] - \omega_n^2[M]) = 0, \quad (3)$$

A matriz de rigidez $[K]$ pode ser obtida a partir das propriedades do material e da geometria dos elementos. Para elementos em série, a rigidez equivalente é calculada por:

$$k_{\{eq\}} = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right)^{-1}, \quad (4)$$

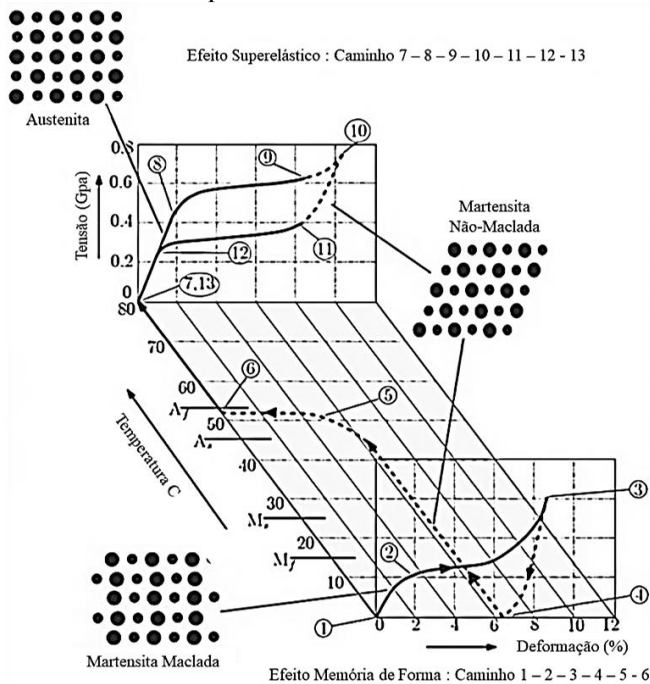
Essa caracterização vibratória é essencial para prever comportamentos indesejados e aplicar técnicas de mitigação, assegurando o desempenho e a confiabilidade dos sistemas.

3.2. Liga de Memória de Forma (LMF)

As ligas com memória de forma (LMF) apresentam fases cristalinas distintas, martensita geminada, martensita orientada e austenita (Mihálcz, 2001) que se transformam conforme temperaturas críticas (M_s , M_f , A_s , A_f , M_d) (Buehler et al., 1963).

Essa transição confere propriedades como efeito memória de forma e superelasticidade (Lagoudas, 2008), permitindo recuperação quase completa após grandes deformações e alta dissipação de energia, tornando as LMF promissoras para controle de vibrações e absorção de impactos.

Figura 3: Gráfico tridimensional de tensão-deformação-temperatura que descreve o comportamento termomecânico da LMF.

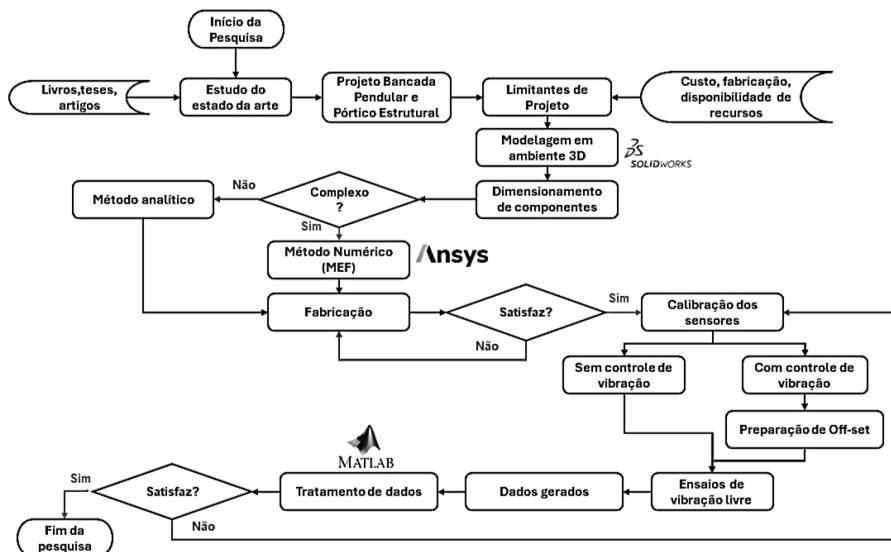


Fonte: Adaptado de Oliveira, A.G. (2022).

4. Metodologia

Inicialmente, definimos nossa metodologia de trabalho por meio de um fluxograma que nos guiará pelos passos a serem seguidos durante o desenvolvimento do projeto.

Figura 4: Fluxograma de projeto.



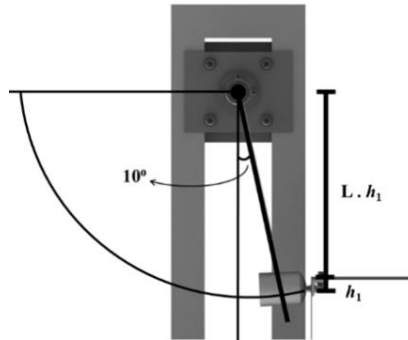
Fonte: Autoria própria.

4.1. Bancada Pendular

Para uma bancada experimental de baixo custo que requer a padronização da força de impacto, um sistema de pêndulo foi escolhido devido à sua simplicidade de fabricação e facilidade de controle. A bancada foi projetada para permitir diferentes configurações de impacto, possibilitando a variação da força aplicada por meio da substituição da massa do pêndulo e do ajuste da altura de queda, e pode ser operada no primeiro ou segundo nível da estrutura.

O eixo de suporte do pêndulo foi usinado em alumínio 3003, material escolhido por sua leveza, menor custo em comparação com o aço, e por favorecer uma contribuição para a posição mais baixa do centro de gravidade (CG) da estrutura, aumentando a estabilidade da estrutura. O eixo foi apoiado por rolamentos esféricos e fixado por anel elástico.

Figura 5: Sistema de pêndulo projetado.



Fonte: Autoria própria.

No sistema de pêndulo, a força de impacto é obtida pela velocidade da massa, estimada a partir da equivalência entre energia potencial gravitacional e energia cinética, conforme a equação 5:

$$mgh_1 = \frac{mv^2}{2} + mgh_2, \quad (5)$$

O projeto visa uma colisão no ponto de impacto 10° da vertical, de forma que o pêndulo retorne após impacto. Para isso, a variação de altura (Δh), que define a energia do sistema, é dada por:

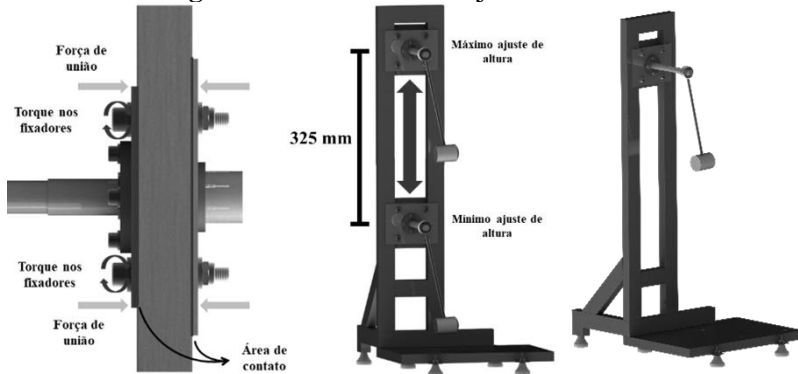
$$\Delta h = L(\cos(10^\circ) - \cos(\theta)), \quad (6)$$

A força de impacto é calculada pela relação da energia com o momento linear, sendo necessário medir o tempo de impacto em cada teste para aplicar a fórmula geral:

$$F = \frac{m^2 \sqrt{2gL(\cos(10^\circ) - \cos(\theta))}}{\Delta t}, \quad (7)$$

A estrutura auxiliar do pêndulo foi construída com tubos de aço retangular 30x50x1,5 mm, utilizando material disponível na UFJF, e apoiada em cinco coxins Vibra-Stop para isolar vibrações. A altura de impacto é ajustada pelo atrito dos parafusos de fixação, permitindo variação do ponto de impacto e maior versatilidade nos ensaios.

Figura 6: Mecanismo de ajuste de altura.



Fonte: Autoria própria.

4.2. Pórtico Estrutural

No projeto preliminar, um modelo simplificado de 1 GDL representou o sistema de dois andares, permitindo análise paramétrica da vibração livre. Variando espessura, comprimento das colunas e massa, constatou-se que parâmetros geométricos e de contorno afetam significativamente os deslocamentos, avaliados por meio de parâmetros adimensionais.

Tabela 1: Parâmetros da seção transversal (mm).

b (base)	h (Altura)	I [m4]
50	0.8	2.13E-12
	1	4.17E-12
	1.2	7.20E-12
	1.5	1.41E-11
	2	3.33E-11

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2: Parâmetros adimensionais.

$\alpha(t/h)$	$\lambda (L1/h)$
1.6	0.13
2.0	0.17
2.4	0.20
3	0.25
4	0.33

Fonte: Autoria própria.

O fator de forma da seção transversal (α), que relaciona a altura com a base da seção transversal, é dado por:

$$\alpha = \frac{h}{b}, \quad (8)$$

A razão entre a altura e a base da seção transversal, usada para avaliar a influência da forma da seção. O índice de esbeltez (λ) quantifica a flexibilidade estrutural em relação à sua geometria:

$$\lambda = \frac{L}{h}, \quad (9)$$

O índice de esbeltez, definido pela razão entre o comprimento L e a altura h da seção, indica a suscetibilidade à flambagem, enquanto o deslocamento máximo em vibração livre pode ser obtido pela expressão correspondente:

$$\sqrt{x_0^2 + \left(\frac{v_0}{\omega_n}\right)^2}, \quad (10)$$

A equação relaciona deslocamento inicial (x_0), velocidade inicial (v_0) e frequência natural (ω_n) para definir a amplitude vibracional, sendo considerados os valores de massa equivalente total para comprimento fixo de 295 mm.

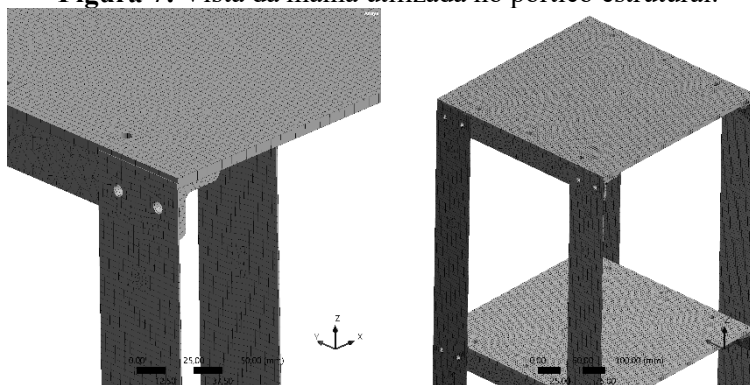
O valor utilizado para o Módulo de Young do aço inoxidável foi de 200 GPa para determinar a rigidez equivalente das vigas, conforme mostrado na Equação 4.

4.3. Análise Numérica

Para a análise numérica, foi desenvolvido um modelo estrutural no software SolidWorks® 2023 e analisado no Ansys® 21.0 para identificar as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. As simulações são fundamentais para verificar o comportamento dinâmico do sistema e identificar previamente possíveis falhas estruturais.

No modelo numérico, foram atribuídas propriedades de material a cada componente. A malha utilizada foi do tipo mista de casca, adequada para componentes de chapa metálica e composta principalmente por elementos hexaédricos, conforme Avelino (2010). A malha totalizou 154.463 nós e 57.824 elementos, com um tamanho médio de 3,0 mm. Como simplificação, a base foi definida como fixa, e os contatos metálicos e o atrito entre componentes foram desconsiderados.

Figura 7: Vista da malha utilizada no pórtico estrutural.



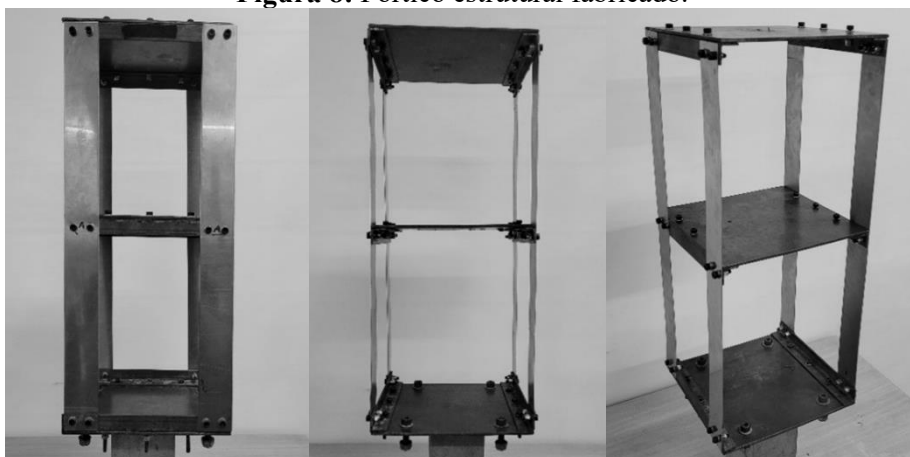
Fonte: Autoria própria.

4.4. Manufatura das Estruturas

Concluída a etapa de dimensionamento, a manufatura dos protótipos foi realizada no Laboratório de Processos de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). A fim de minimizar erros geométricos durante a montagem, gabaritos de papel impressos em escala real (1:1) foram utilizados para guiar o corte das chapas de aço carbono AISI 1020 e das colunas de aço inox 430, que foi realizado com uma esmerilhadeira.

O processo de usinagem dos componentes foi executado com equipamentos de precisão. Um torno mecânico foi empregado para usinar as peças cilíndricas, enquanto uma fresadora foi utilizada para a perfuração dos furos de fixação, garantindo a alta precisão dimensional necessária para a montagem. Após a usinagem, as dimensões de cada componente foram inspecionadas com um paquímetro para assegurar a conformidade com as tolerâncias do projeto. Para a união das partes, empregaram-se parafusos de aço com porcas autotravantes, do tipo Parlock, a fim de evitar o afrouxamento dos componentes devido à vibração.

Figura 8: Pórtico estrutural fabricado.



Fonte: Autoria própria.

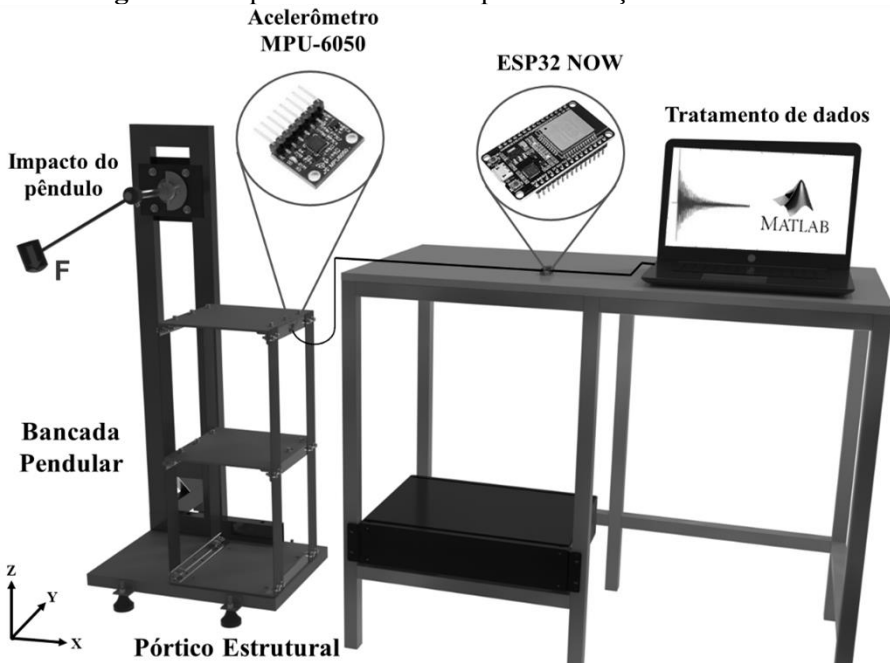
4.5. Ensaio Experimental

Análise de vibração livre foi realizada para identificar experimentalmente as frequências naturais da estrutura por meio da análise do espectro de frequência. Adicionalmente, a resposta dinâmica da estrutura à aplicação de uma força de impacto transiente foi registrada, possibilitando a obtenção de gráficos que representam a aceleração em função do tempo.

O experimento foi conduzido em duas etapas distintas. Para isso, foram instalados acelerômetros no primeiro e segundo andares da estrutura, bem como uma massa de pêndulo aplicada ao segundo andar com uma intensidade de força padronizada de acordo com o ângulo de soltura, conforme mostrado no esquemático da Figura 9.

Os sinais de aceleração foram capturados por acelerômetros MPU-6050 e processados por um microcontrolador ESP32. A transmissão dos dados para o computador foi realizada via USB; optou-se por este método para evitar a imprecisão nos dados que pode ocorrer ao usar um cartão SD, cuja taxa de gravação é uma limitação. Os sinais obtidos foram então processados no ambiente Matlab®, aplicando o método dos mínimos quadrados e a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para validar os resultados do modelo numérico proposto.

Figura 9: Esquemático utilizado para realização dos ensaios.

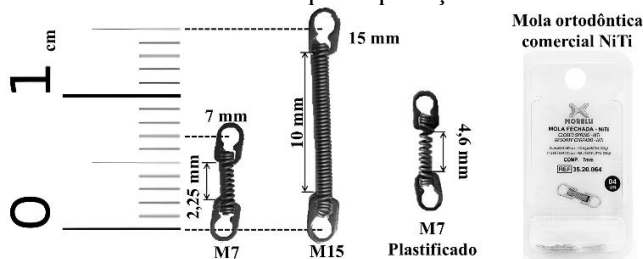


Fonte: Autoria própria.

Nos testes experimentais, aplicaram-se forças a 30° e 50° . Após o impacto do pêndulo, a estrutura vibrou livremente por cerca de 50 s, quando os dados foram registrados.

As molas superelásticas de LMF utilizadas, modelos comerciais M7 e M15, permitiram comparar a dissipação de energia pelo ciclo de histerese, sendo que maiores deformações ampliam esse efeito. Seus comprimentos úteis 2,25 mm (M7) e 10 mm (M15), influenciaram o comportamento vibratório.

Figura 10: Molas helicoidais LMF para aplicação no controle vibracional.

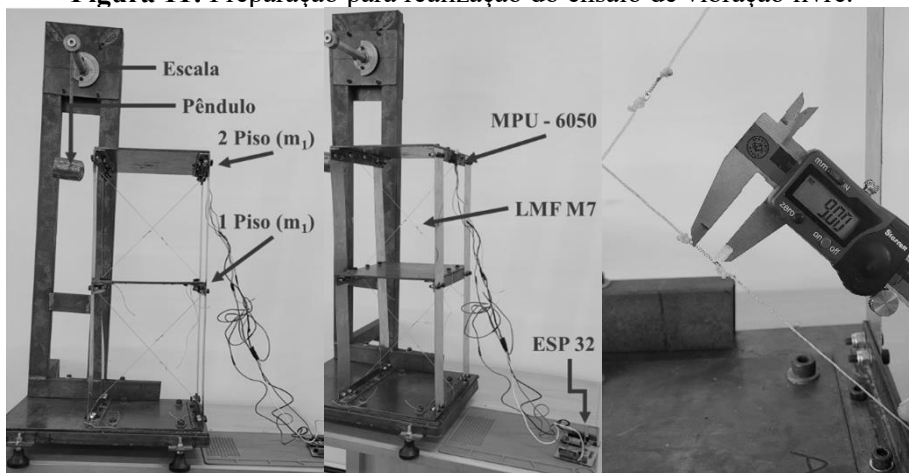


Fonte: Autoria própria.

As minimolas superelásticas foram dispostas em configuração contraventada em "X", aproveitando os deslocamentos diagonais para manter tração ativa contínua, o que maximiza a dissipação de energia e melhora o amortecimento.

No experimento, as molas foram testadas em duas condições de pré-tensionamento. Na primeira, foram alongadas em 300% do comprimento útil como mostra a figura 11, o que proporcionou melhor sobreposição entre as curvas de carga e descarga, favorecendo a dissipação de energia. Na segunda, utilizaram-se apenas 100% do comprimento original, condição em que o comportamento se aproximou ao de uma mola comum, com baixa eficiência dissipativa. Para garantir estabilidade nos ensaios, as molas foram fixadas à estrutura com tiras de nylon presas aos olhais e amarradas à armação do protótipo.

Figura 11: Preparação para realização do ensaio de vibração livre.



Fonte: Autoria própria.

5. Resultados

5.1. Análise Paramétrica

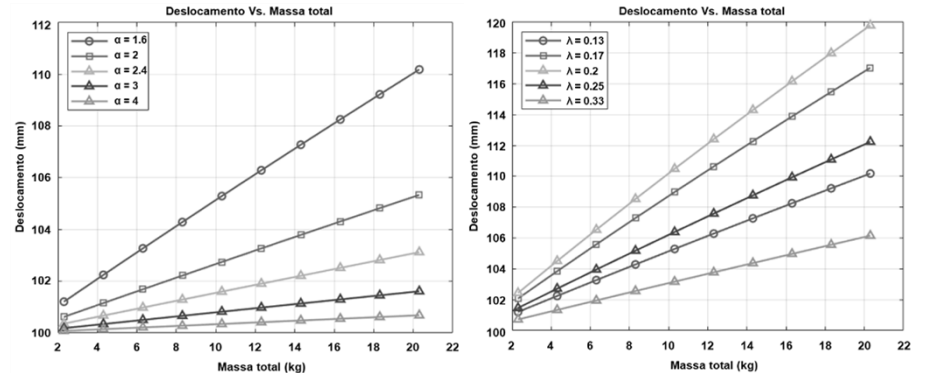
A análise paramétrica avaliou deslocamento máximo e frequência natural em função de dois parâmetros adimensionais: α (robustez da seção) e λ (esbeltez da coluna).

Os resultados mostram que o deslocamento aumenta com a massa e a esbeltez, e diminui com a robustez, fornecendo critérios para selecionar a

geometria final do protótipo considerando desempenho dinâmico, custo e viabilidade de fabricação. Esses valores foram avaliados em função de dois parâmetros adimensionais α e λ .

A análise de deslocamento mostrou que ele cresce linearmente com a massa e a esbeltez da coluna, enquanto diminui com a robustez da seção transversal. Esses resultados quantificaram a influência dos parâmetros e serviram de base para definir a geometria final do protótipo, equilibrando desempenho dinâmico, custo e viabilidade de fabricação.

Figura 12: Influência dos parâmetros da seção transversal e do comprimento da coluna.



Fonte: Autoria própria.

As dimensões finais do pórtico foram definidas considerando disponibilidade, restrições do projeto, massa, custo e manufaturabilidade. Essa análise selecionou a configuração que melhor equilibra os fatores, garantindo viabilidade e confiabilidade do protótipo.

Tabela 3: Parâmetros finais.

Parâmetros	Valor	Unidade
Comprimento (L)	600	Milímetros
Massa total (mT)	10	Quilograma
Espessura (h)	1	Milímetros
Largura (b)	50	Milímetros

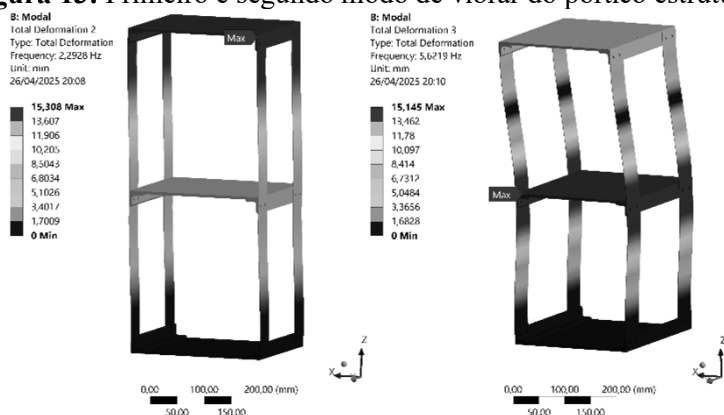
Fonte: Autoria própria.

5.2. Análise Numérica Modal

A análise modal revelou o comportamento dinâmico da estrutura. Para o primeiro modo de vibrar, foi observado que as amplitudes máximas de

deslocamento se concentram no segundo pavimento. Já o segundo modo de vibrar apresentou um padrão de movimento em contrafase entre os andares, com o segundo pavimento exibindo, novamente, a maior deformação. O modelo numérico indicou uma primeira frequência natural de 2,29 Hz, valor que demonstrou boa correlação com as previsões do modelo analítico, reforçando a validade da simulação. A obtenção de uma frequência natural baixa foi um critério determinante para a definição da geometria final do protótipo, detalhada na Tabela 3, visando minimizar o risco de ressonância durante os ensaios.

Figura 13: Primeiro e segundo modo de vibrar do pórtico estrutural.



Fonte: Autoria própria.

5.3. Ensaio Experimental

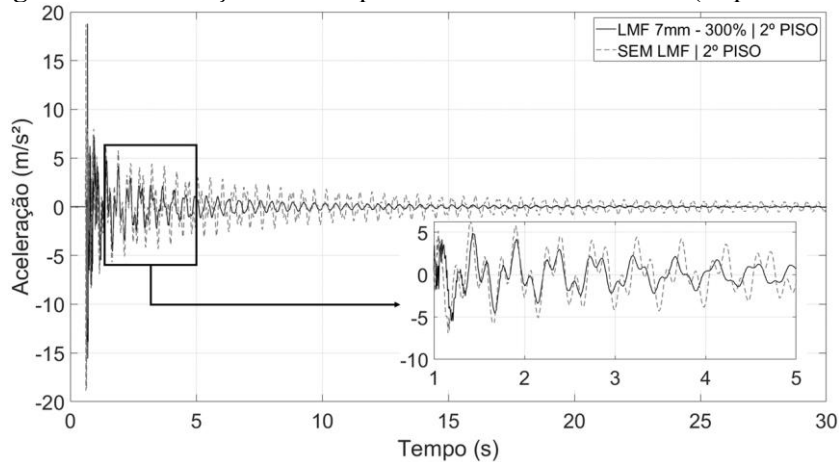
A análise experimental foi conduzida por meio de ensaios de vibração livre no pórtico estrutural, considerando impactos no segundo pavimento. O objetivo foi comparar o comportamento da estrutura nas condições sem molas e com molas superelásticas de NiTi, sob diferentes níveis de pré-tensionamento e deslocamento inicial.

Os primeiros testes foram realizados com impacto de 30°, conforme apresentado na Figura 14. Com a instalação das molas de NiTi, a aceleração média, que era de 0,13 m/s² no sistema original, foi reduzida para 0,07 m/s², o que representa uma expressiva queda de 46%. De forma ainda mais significativa, o tempo de acomodação diminuiu de 18,1 segundos para apenas 6 segundos, uma redução de 67%.

A eficiência do amortecimento é notável, pois o sistema com LMF cessou completamente sua vibração antes dos 30 segundos, enquanto a

estrutura sem mola permaneceu vibrando mesmo após o fim do ensaio de 50 segundos. Essa rápida atenuação da resposta vibratória é fundamental para a integridade estrutural, pois reduz a severidade das cargas dinâmicas e o número de ciclos de tensão aplicados aos componentes.

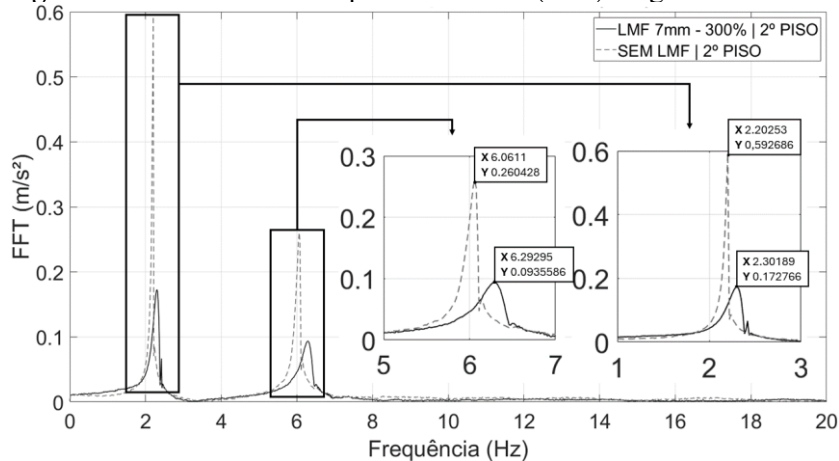
Figura 14: Aceleração vs. Tempo: Mola M7 vs. Sem Mola (Impacto 30°).



Fonte: Autoria própria.

A Transformada Rápida de Fourier (FFT), apresentada na Figura 15, evidencia reduções expressivas nas amplitudes de resposta. Foram observadas diminuições de aproximadamente 50% no primeiro modo e de mais de 62% no segundo modo, confirmando o efeito dissipativo das molas.

Figura 15: Transformada Rápida de Fourier (FFT) 30 graus M7 300%.



Fonte: Autoria própria.

Os valores experimentais também foram comparados com os resultados obtidos na análise numérica via ANSYS®, conforme a Tabela 4. Observa-se que a variação relativa foi inferior a 10%, validando o modelo modal adotado e reforçando a confiabilidade da metodologia.

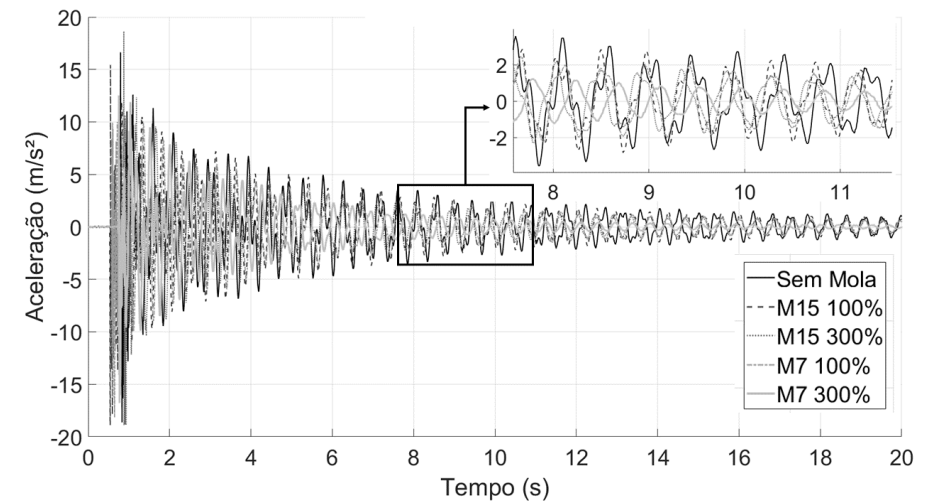
Tabela 4: Comparação dos Modos de Vibrar.

Frequência Natural	Numérico ANSYS® (Hz)	Experimental (Hz)		Variação (%)	
		Sem LMF	LMF	Sem LMF	LMF
f_1	2,3425	2,20	2,30	6,48	1,85
f_2	5,7442	6,06	6,29	5,21	8,68

Fonte: Autoria própria.

Nos ensaios com impactos de 50°, foram analisadas as molas comerciais M7 e M15 sob pré-tensionamentos de 100% e 300% para avaliar seu desempenho no amortecimento da estrutura relacionado ao comprimento útil e o *offset* da mola. A resposta temporal, apresentada a seguir, evidencia o desempenho superior da mola M7. A configuração com 300% de *offset* se mostrou a mais eficiente, reduzindo significativamente a amplitude média dos picos para 0,08 m/s² e promovendo o menor tempo de acomodação, de 9,1 s. Em contraste, a mola M15 apresentou uma dissipação de energia mais lenta, especialmente com 100% de *offset*, prolongando o tempo de estabilização da resposta para 19,3 s devido ao seu maior comprimento útil.

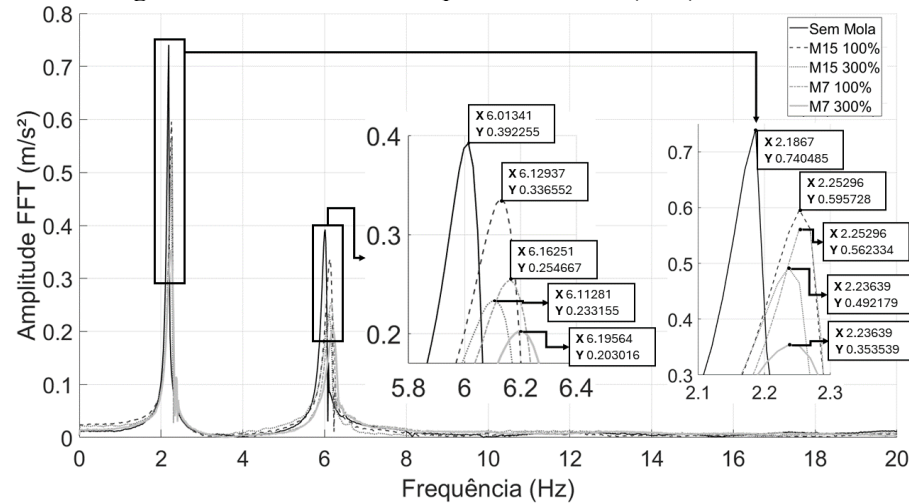
Figura 16: Aceleração x Tempo 50 Graus.



Fonte: Autoria própria.

A tendência observada no domínio do tempo é confirmada e quantificada pela análise no domínio da frequência. Os resultados da Transformada Rápida de Fourier (FFT) permitem avaliar a influência das molas nas amplitudes dos modos de vibração. Conforme detalhado na figura e na tabela seguintes, nota-se que a mola M7 com 300% de *offset* promoveu as maiores reduções de amplitude nos dois primeiros modos de vibração, com quedas de 52,26% e 48,24%, respectivamente.

Figura17: Transformada Rápida de Fourier (FFT) 50 Graus.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5: Comparativo de amplitude da FFT para os dois primeiros modos.

Sinal	Offset	Amplitude Primeiro Modo (m/s²)	Redução Primeiro Modo (%)	Amplitude Segundo Modo (m/s²)	Redução Segundo Modo (%)
Sem Mola	---	0,74	---	0,39	---
M15	100%	0,60	19,55	0,34	14,20
	300%	0,49	33,53	0,23	40,56
M7	100%	0,56	24,06	0,25	35,08
	300%	0,35	52,26	0,20	48,24

Fonte: Autoria própria.

Portanto, os resultados experimentais de ambas as análises, temporal e em frequência, confirmam que a mola superelástica M7 com *offset* de 300% representa a configuração de melhor desempenho para o controle passivo de

vibração, otimizando a redução de amplitudes e o tempo de acomodação do sistema.

6. Considerações Finais

Este trabalho demonstrou o desenvolvimento e a validação de um aparato experimental de baixo custo para o estudo de controle passivo de vibrações. A bancada projetada cumpriu seu objetivo, permitindo a análise precisa do sistema, o que foi corroborado pela excelente concordância entre os resultados experimentais e o modelo numérico.

A validação do modelo foi confirmada quantitativamente pela análise modal. As frequências naturais identificadas experimentalmente para o pórtico sem amortecimento, sendo 2,20 Hz para o primeiro modo de vibrar e 6,06 Hz para o segundo, apresentaram uma forte correlação com as previstas pelo modelo em elementos finitos, de 2,34 Hz e 5,74 Hz, respectivamente. Isso resultou em um desvio relativo de apenas 6,48% para o primeiro modo e 5,21% para o segundo. Essa proximidade valida o sistema experimental como uma ferramenta confiável para a análise de vibrações estruturais.

A investigação sobre o uso de molas de NiTi como elementos dissipativos revelou um desempenho notável, especialmente para a mola M7 com 300% de pré-tensionamento. Nos ensaios de impacto de 50°, esta configuração não apenas reduziu o tempo de acomodação para 9,1 segundos, mas também promoveu as reduções de amplitude mais expressivas. Conforme os dados da análise em frequência, foram alcançadas reduções de 52,26% na amplitude do primeiro modo de vibração e de 48,24% na do segundo modo.

Este resultado evidencia que a eficiência do controle passivo está diretamente ligada não apenas ao comprimento da mola, mas também à aplicação de um *offset* adequado, que é crucial para maximizar o efeito histerético e a dissipação de energia. A metodologia e os resultados validam o potencial de componentes comerciais de LMF como uma solução eficiente para a mitigação de vibrações estruturais.

7. Referências

Avelino, A. A. F. (2010). **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE** (3ª ed.). Editora Érica.

Buehler, W. J., Gilfrich, J. V., & Wiley, R. C. (1963). Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. **Journal of Applied Physics**, 34(5), 1475–1477.

Clough, R. W., & Penzien, J. (1993). **Dynamics of Structures** (2^a ed.). McGraw-Hill.

Inman, D. J. (2013). **Engineering Vibration** (4^a ed.). Pearson.

Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. **Materials & Design**, 56, 1078–1113.

Lagoudas, D. C. (2008). **Shape memory alloys: Modeling and engineering applications**. Springer Science Business Media.

Meirovitch, L. (2001). **Fundamentals of Vibrations**. McGraw-Hill.

Mihálcz, I. (2001). Fundamental characteristics and design method for nickel titanium shape memory alloy. **Periodica Polytechnica Mechanical Engineering**, 45(1), 75–86.

Oliveira, A. G. (2022). **Controle de vibração em pás de rotor de helicóptero com pitch link superelástico de LMF-NiTi** [Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba]. Repositório Institucional da UFPB.

Oliveira, B. A. (2008). **Desenvolvimento de um isolador de vibração pseudoelástico** [Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília]. Repositório Institucional da UnB.

Rao, S. (2008). **Vibrações Mecânicas** (4^a ed.). Pearson-Prentice Hall.

Song, G., Ma, N., & Li, H. N. (2006). Applications of shape memory alloys in civil structures. **Engineering Structures**, 28, 1266–1274.

Spencer Jr., B. F., & Soong, T. T. (1999). New applications and development of active, semi-active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the USA. In **Proceedings of the International Post-SMIRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures**.

Timoshenko, S. (1940). **Vibration Problems in Engineering** (2^a ed.). D. Van Nostrand Company, Inc.

7- Material particulado atmosférico: determinação de elementos-traço e implicações ambientais

Aparecida Maria Simões Mimura²⁴

Eduardo de Oliveira Lima²⁵

Cássia de Castro Martins Ferreira²⁶

Júlio César José da Silva²⁷

Poluição Atmosférica

A atmosfera terrestre constitui uma camada relativamente fina de gases que envolve o planeta, composta predominantemente por nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂), além de componentes minoritários como argônio (Ar), dióxido de carbono (CO₂) e vapor d'água, entre outros. Esses gases permanecem retidos na Terra em razão da ação conjunta da gravidade e do campo magnético. Além da fase gasosa, na atmosfera são encontradas partículas sólidas ou líquidas suspensas no ar, denominadas particulados, que, embora frequentemente invisíveis a olho nu, exercem efeitos significativos sobre o ambiente (Baird, 2002).

A modificação da composição natural da atmosfera, decorrente da introdução de substâncias que afetam negativamente os organismos vivos ou provocam alterações físico-químicas em materiais e ecossistemas, caracteriza a poluição atmosférica (Resolução CONAMA, 1990). Atualmente, essa forma de poluição constitui um problema ambiental de escala global, com impactos sobre os ecossistemas, o clima, a visibilidade, a saúde humana e o bem-estar das populações. Com algumas exceções locais, observa-se o agravamento da

²⁴ Doutora em Química, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Colegiado de Licenciatura em Química, aparecida.mimura@univasf.edu.br, ORCID 0000-0003-4408-7382.

²⁵ Mestrando em Química, Universidade Federal de Juiz de Fora, eduardo.lima@estudante.ufjf.br, ORCID 0009-0000-6647-9059

²⁶ Doutora em Geografia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Geociências, E-mail: cassia.castro@ufjf.br, ORCID 0000-0002-6070-7257

²⁷ Doutor em Química, Universidade Federal de Juiz de Fora, julio.silva@ufjf.br, ORCID 0000-0002-8708-1557

qualidade do ar em países desenvolvidos e em desenvolvimento (Nowak, 2014).

Diversos parâmetros determinam a qualidade do ar, entre eles a presença de gases contaminantes e de material particulado. No Brasil, os padrões nacionais de qualidade do ar foram estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990, que define limites para alguns poluentes atmosféricos, incluindo o material particulado, o dióxido de enxofre (SO₂), o dióxido de nitrogênio (NO₂), o monóxido de carbono (CO) e o ozônio (O₃) (CONAMA, 1990).

Nas últimas décadas, o aumento da população urbana e a intensificação das atividades industriais impulsionaram a adoção de medidas voltadas ao controle das emissões em diversos setores, o que resultou na redução dos níveis de poluentes, especialmente de SO₂ e de material particulado (Vieira-Filho, 2015). Contudo, a emissão veicular continua sendo uma fonte relevante de contaminação atmosférica, dado o crescimento contínuo da frota de veículos nas áreas urbanas (Tavares, 2010).

Material Particulado

A presença de elevadas concentrações de material particulado (MP) na atmosfera pode gerar múltiplos impactos ambientais e socioeconômicos, incluindo a redução da produtividade agrícola, danos a florestas, degradação de edificações e obras de arte, além de efeitos adversos à saúde humana. A exposição ao MP pode ocorrer por inalação direta ou por rotas indiretas, como a contaminação de recursos hídricos, alimentos e solos, e até mesmo por absorção cutânea (Queiroz, 2007; Wei & Yang, 2010). Os efeitos sobre a saúde variam conforme a intensidade e a duração da exposição, bem como em função das condições fisiológicas da população afetada. Crianças, idosos e indivíduos com doenças respiratórias ou cardiovasculares constituem os grupos mais vulneráveis à poluição atmosférica (Fornaro, 2006; Silva, 2010).

Além de seus impactos diretos sobre os seres vivos e o ambiente, o MP influencia processos atmosféricos fundamentais, como a formação de chuvas. Determinados tipos de aerossóis podem absorver radiação solar, aquecendo camadas atmosféricas e reduzindo a formação de nuvens, o que leva ao aumento da temperatura da superfície terrestre. Outros, em contrapartida, refletem a radiação solar de volta ao espaço, provocando resfriamento atmosférico e contribuindo para o arrefecimento da superfície e para a ocorrência de precipitações (Artaxo, 2002). O MP também pode atuar como núcleo de

condensação de nuvens, facilitando a condensação do vapor d'água com menor gasto energético e em ambientes com nível de saturação atmosférico reduzido (Rocha, 2004; Khan, 2010; Oliveira, 2013).

A composição do MP varia conforme as características geológicas e as atividades antrópicas desenvolvidas em determinada região. Em geral, o MP é constituído predominantemente por óxidos de Al, Si, Ca, Ti, Fe, dentre outros óxidos metálicos, além de uma diversidade de compostos orgânicos (de origem biogênica ou resultantes da combustão de matéria orgânica) e inorgânicos, como sulfatos, nitratos e amônia (Quiterio, 2004; Queiroz, 2007).

Quanto ao tamanho das partículas, a classificação baseia-se no diâmetro aerodinâmico médio (d), que pode variar desde a ordem de nm até cerca de 100 μm (Quiterio, 2004; Loyola, 2009). As partículas totais em suspensão (PTS) compreendem aquelas com $d < 100 \mu\text{m}$. Partículas maiores apresentam pequeno tempo de permanência na atmosfera, sedimentando-se com facilidade devido à ação da gravidade. No Brasil, os padrões referentes ao material particulado foram definidos pela Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990, que estabelece parâmetros e limites para avaliação da concentração de PTS na atmosfera. Para amostras de PTS coletadas por meio do método de amostrador de grandes volumes ou por método equivalente, a resolução distingue dois tipos de padrões de qualidade do ar. O padrão primário, que representa as concentrações de poluentes acima das quais podem ocorrer efeitos adversos à saúde humana; e o padrão secundário, que corresponde a níveis de concentração abaixo dos quais se prevê impacto mínimo ao bem-estar da população, bem como à fauna, flora, materiais e ao meio ambiente em geral. Para amostras de PTS, o padrão primário estabelece uma concentração média geométrica anual de $80 \mu\text{g m}^{-3}$ e uma concentração média diária de $240 \mu\text{g m}^{-3}$, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano. Já o padrão secundário define valores de $60 \mu\text{g m}^{-3}$ (média anual) e $150 \mu\text{g m}^{-3}$ (média diária) (Resolução CONAMA, 1990).

As partículas com $d < 2,5 \mu\text{m}$ e com $d < 10 \mu\text{m}$, denominadas $\text{MP}_{2,5}$ e MP_{10} , respectivamente, são aquelas que mais influenciam a qualidade do ar em áreas urbanas. Os dados referentes a $\text{MP}_{2,5}$ e MP_{10} geralmente expressam a concentração do material particulado por unidade de volume de ar ($\mu\text{g m}^{-3}$) e têm sido amplamente utilizados no monitoramento da qualidade do ar em diversos países (Baird, 2002). No Brasil, de acordo com a Resolução CONAMA nº 3/1990, para amostras de MP_{10} os padrões de qualidade do ar estabelecem uma concentração média aritmética anual de $50 \mu\text{g m}^{-3}$ e uma

concentração média diária de $150 \mu\text{g m}^{-3}$, sendo que esta última não deve ser ultrapassada mais de uma vez por ano (CONAMA, 1990).

O tamanho das partículas está diretamente relacionado ao seu potencial de causar danos à saúde humana. De acordo com o nível de penetração no trato respiratório, o material particulado pode ser classificado em partículas respiráveis ($\text{MP}_{2,5}$) e partículas inaláveis (MP_{10}). As partículas MP_{10} tendem a se acumular nas vias respiratórias superiores, enquanto as $\text{MP}_{2,5}$ podem atingir os alvéolos pulmonares, regiões em que os mecanismos de expulsão não são totalmente eficientes. Nessas condições, as partículas $\text{MP}_{2,5}$ podem alcançar a corrente sanguínea ou permanecer retidas, provocando uma série de complicações à saúde, incluindo doenças respiratórias e cardiopulmonares. Entre as principais patologias associadas à exposição elevada a MP destacam-se alergias, asma, enfisema pulmonar, bronquite crônica, câncer de pulmão e infarto do miocárdio (Quiterio, 2004; Queiroz, 2007; Loyola, 2009; Tavares, 2010; Tran, 2012; Almeida, 2013; Tavares, 2014).

Do ponto de vista ambiental, as partículas inaláveis podem ser subdivididas em moda fina ($d < 2,5 \mu\text{m}$) e moda grossa ($2,5 \mu\text{m} < d < 10 \mu\text{m}$) (Queiroz, 2007). As partículas da moda grossa geralmente permanecem na atmosfera por períodos curtos e se depositam relativamente próximas às fontes emissoras. Em contrapartida, as partículas da moda fina apresentam longo tempo de permanência, variando de dias a semanas, e podem ser transportadas por centenas ou milhares de quilômetros, dependendo da ação do vento. Esse transporte permite que o $\text{MP}_{2,5}$ contamine áreas distantes das fontes originais, com impactos em escalas regional e até global (Baird, 2002; Azevedo & Chasin, 2003; Rocha, 2004; Pereira, 2007; Shaltout, 2014).

O MP presente na atmosfera pode ser originado tanto de fontes naturais quanto de atividades antrópicas. Entre as fontes naturais, destacam-se processos primários como a ressuspensão de poeira do solo, o spray marinho, a poeira vulcânica e o material biológico, incluindo pólen, vírus e bactérias. As fontes naturais secundárias incluem a emissão de gases biogênicos, gases vulcânicos, compostos orgânicos biogênicos e óxidos de nitrogênio (NO_x), que contribuem com partículas finas e grossas na atmosfera. Dessa forma, as fontes naturais apresentam grande diversidade de origens e tamanhos de partículas, influenciando diretamente a composição do MP atmosférico (Rocha, 2004).

No que se refere às atividades humanas, as fontes primárias incluem emissões industriais e a fuligem, que geram partículas finas e grossas. Entre as fontes secundárias de origem antrópica, destacam-se o gás SO_2 , a queima de

biomassa, os NO_x e os compostos orgânicos, contribuindo para a presença de partículas finas e grossas no ar urbano (Rocha, 2004).

Embora as fontes naturais representem uma parcela significativa das emissões de MP na atmosfera, observa-se um aumento expressivo das emissões de origem antrópica ao longo dos anos. Entre essas fontes, destacam-se as atividades agrícolas, como a aplicação de pesticidas e fertilizantes; as atividades industriais, incluindo a extração e o beneficiamento de minérios, fundição, metalurgia, siderurgia, usinas termelétricas baseadas na combustão de carvão e incineradores de resíduos urbanos e industriais. Além disso, a indústria petroquímica, as emissões veiculares (provenientes tanto dos escapamentos quanto do desgaste de peças automotivas) e as queimadas contribuem de forma significativa para a liberação de partículas na atmosfera (Pereira, 2007; Wei & Yang, 2010; Guéguen, 2012; Loyola, 2012; Oakes, 2016).

Em estudos de caracterização atmosférica, as amostras de MP são geralmente coletadas por meio de amostradores ativos (Queiroz, 2007; Khan, 2010; Magalhães *et al.*, 2010; Castilho, 2012; Loyola, 2012; Mateus, 2013; Oliveira, 2013), que realizam a sucção do ar ambiente utilizando uma bomba. Alguns desses equipamentos permitem a coleta diferenciada de partículas totais em suspensão PTS, MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$, possibilitando uma análise mais detalhada da dinâmica atmosférica local, já que essas frações apresentam distintos tempos de residência na atmosfera. O período de amostragem pode variar entre 1 e 24 h, conforme o objetivo do estudo. Assim, é possível determinar a concentração de MP em ng m^{-3} e avaliar a qualidade do ar em relação aos padrões nacionais e internacionais. Contudo, esse método de coleta apresenta algumas limitações, uma vez que os amostradores ativos são, em geral, equipamentos sofisticados e de alto custo, além de exigirem suprimento contínuo de energia elétrica, o que dificulta a realização de amostragens simultâneas em múltiplos locais (Vanz, 2003; Canha, 2014; Muller, 2016; Mimura, 2017).

Para minimizar essas limitações, podem ser empregados, de forma alternativa, os amostradores passivos, os quais são dispositivos capazes de reter o MP sem a necessidade de uma bomba de sucção para forçar a entrada de ar no sistema (Cruz & Campos, 2002). Embora, nesse caso, não seja possível calcular a concentração de MP em ng m^{-3} , os amostradores passivos mostram-se úteis para a determinação das taxas de deposição seca (expressas em $\text{kg km}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e para a avaliação qualitativa da composição química das amostras de MP (Montoya-Mayor, 2013; Fang, 2014). Além disso, por apresentarem custo

significativamente inferior aos amostradores ativos, esses dispositivos podem ser instalados em rede, permitindo o monitoramento espacialmente ampliado da deposição de MP em uma determinada região.

A amostragem passiva de MP tem sido empregada em diversos estudos, demonstrando sua versatilidade e aplicabilidade em diferentes contextos. Brait e Filho (2010) desenvolveram um sistema passivo de amostragem para simular a deposição de MP em penas de aves em Goiânia (GO), considerando que esses animais podem atuar como bioindicadores da poluição atmosférica. Vanz (2003) elaboraram um coletor passivo para investigar a contaminação atmosférica por Pb particulado na cidade de Rio Grande (RS). Jiries (2002) aplicaram a técnica de coleta passiva de MP na Jordânia, uma região de clima semiárido. Amostradores passivos também foram instalados em ambientes industriais, urbanos e rurais em cidades da França e da Alemanha, a fim de caracterizar quimicamente a atmosfera e avaliar a influência do relevo na dispersão dos contaminantes (Guéguen, 2012). Tran (2012) realizaram a coleta de MP em salas de aula na França, com o intuito de observar a exposição de crianças a esse tipo de material. Nesse caso, as principais vantagens do método passivo incluíram a ausência de ruído, o que evitou interferências nas aulas, e o baixo custo operacional, além de evitar que equipamentos caros viessem a ser danificados por situações diversas na sala de aula.

Ao contrário do que se observa em países da Europa e nos Estados Unidos, o Brasil ainda não dispõe de uma rede nacional de monitoramento das emissões atmosféricas devidamente estruturada e distribuída pelo território. No estado de São Paulo, essas atividades têm sido conduzidas principalmente pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), responsável por manter programas regulares de acompanhamento da qualidade do ar. No restante do país, entretanto, o monitoramento é realizado de forma pontual, por meio de estudos acadêmicos desenvolvidos por grupos de pesquisa em regiões específicas e, em geral, por períodos limitados. Exemplos desses esforços incluem investigações sobre MP conduzidas no Rio de Janeiro (RJ) (Quiterio, 2004; Loyola, 2009; Loyola, 2012; Mateus, 2013), São Paulo (SP) (Rocha, 2012), Araraquara (SP) (Oliveira, 2013), Belo Horizonte (MG) (Tavares, 2014), Ouro Preto (MG) (Magalhães, 2010), Sete Lagoas (MG) (Queiroz, 2007), Salvador (BA) (Pereira, 2007), Goiânia (GO) (Brait & Filho, 2010), Rio Grande (RS) (Vanz al., 2003), Aracaju (SE) (Almeida, 2013) e Cuiabá (MT) (Neis, 2008), Juiz de Fora (MG) (Mimura, 2017) entre outros.

Elementos-traço

Na superfície do MP podem ser encontrados diversos constituintes, entre os quais se destacam os elementos-traço (Shaltout, 2008). O estudo desses elementos em amostras de MP é essencial para compreender a influência da poluição atmosférica sobre a saúde humana e o meio ambiente (Magalhães, 2010).

Devido à sua abundância na crosta terrestre, elementos como Al, Fe e Mn costumam ser encontrados em maiores concentrações na atmosfera. Em contrapartida, elementos como As, Cd, Cr, Cu, Pb e Zn apresentam concentrações muito mais baixas na crosta terrestre, geralmente na ordem de partes por milhão ou menos, sendo por isso, denominados elementos-traço (Manahan, 1993). Alguns desses elementos, como Cr, Cu e Zn, desempenham funções biológicas importantes e são essenciais ao metabolismo de diversos organismos. No entanto, quando presentes em concentrações elevadas, podem exercer efeitos tóxicos sobre microrganismos, plantas, animais e seres humanos, provocando doenças como câncer, hipertensão e distúrbios cardíacos e pulmonares (Shaltout, 2014; Ahmed, 2016). Por outro lado, elementos como As, Cd e Pb não possuem função biológica conhecida e apresentam toxicidade mesmo em baixas concentrações (Marín, 2001; Baird, 2002; Azevedo & Chasin, 2003).

Dentre os elementos destacados, o Al é o metal mais abundante na crosta terrestre, correspondendo a aproximadamente 8,13% (m/m), e ocorre predominantemente na forma de aluminossilicatos, como feldspato e mica. É amplamente empregado em diversos setores industriais, incluindo transportes, fabricação de cabos condutores, embalagens, utensílios domésticos, ligas metálicas e construção civil. A presença de Al na atmosfera está associada principalmente à ressuspensão de poeira do solo, embora possa haver contribuição de atividades humanas, como mineração, processos industriais e práticas agrícolas. No organismo humano, o Al é encontrado naturalmente, sobretudo nos pulmões, nos tecidos ósseos e na pele. A exposição ocupacional a esse metal pode ocasionar bronquite crônica, e alguns estudos apontam a possibilidade de efeitos neurológicos decorrentes, como disfunções motoras e perda parcial da função cognitiva (Azevedo & Chasin, 2003).

Ao lado do Al, o Fe é um dos elementos metálicos mais relevantes no ambiente terrestre, estando presente em praticamente todas as rochas e solos, geralmente combinado com O, Si ou S. O elevado teor de Fe em seus minérios,

que pode variar entre 60 e 67% (m/m) nas hematitas, confere ao Brasil posição de destaque no cenário mundial, com importantes reservas localizadas principalmente no estado de Minas Gerais. O Fe possui ampla aplicação industrial, sendo empregado nas indústrias metalúrgica, siderúrgica, na fabricação de ímãs, tintas e materiais de soldagem, entre outras. Sua presença na atmosfera está associada predominantemente a processos naturais, embora possa haver contribuição de atividades antrópicas específicas. No organismo humano, o Fe é encontrado principalmente na hemoglobina, onde atua no transporte de oxigênio aos tecidos. A deficiência de Fe no corpo pode causar alterações no metabolismo muscular, disfunções no sistema imunológico e anemia, uma condição reconhecida como problema de saúde pública em escala global. Embora casos de intoxicação sejam raros, a exposição a elevadas concentrações pode ocasionar danos pulmonares e favorecer a formação de radicais livres, desencadeando diversos processos oxidativos no organismo (Azevedo & Chasin, 2003; Pereira, 2007; Tavares, 2014).

Após o Fe e o Al, o Mn é o metal de transição mais abundante na crosta terrestre, estando amplamente distribuído no solo, na água e na atmosfera. Frequentemente presente em minérios de Fe, o Mn é utilizado na produção de ligas metálicas e na fabricação de aço. Na atmosfera, sua presença pode estar relacionada à erosão do solo, mas também a fontes antrópicas, como emissões industriais, fundições e processos de combustão, que originam partículas finas com elevadas concentrações do metal. O Mn é um elemento essencial ao organismo humano, atuando como cofator de diversas enzimas e compondo metaloproteínas. A deficiência de Mn pode ocasionar anormalidades esqueléticas e reprodutivas, enquanto a exposição a doses elevadas está associada a distúrbios pulmonares e neurológicos (Azevedo & Chasin, 2003).

O Cr é encontrado naturalmente em rochas, animais, plantas, solo, poeiras e névoas vulcânicas. É utilizado na produção de ligas metálicas, aço inoxidável, na construção civil, em tinturarias e em outros setores industriais. Sua presença na atmosfera decorre tanto de processos naturais, com destaque para incêndios florestais, quanto de atividades industriais. No organismo humano, o Cr (III) atua como nutriente essencial, participando da ação da insulina e do metabolismo de carboidratos, gorduras e proteínas. Entretanto, a exposição ocupacional ao Cr (VI), forma tóxica do elemento, pode provocar diversos tipos de câncer e disfunções renais (Quináia & Nóbrega, 2000; (Azevedo & Chasin, 2003).

O Cu está distribuído na crosta terrestre, ocorrendo tanto no estado elementar quanto em minerais como sulfetos, arsenitos, cloretos e carbonatos. Entre as fontes naturais de Cu na atmosfera, destacam-se as poeiras, seguidas de emissões vulcânicas, processos biogênicos, incêndios florestais e névoas aquáticas. O Cu é empregado em processos industriais, incluindo galvanoplastia, produção de ligas metálicas, fios condutores, tubulações, moedas e baterias. Além das fontes industriais, as emissões veiculares têm sido associadas à presença de Cu na atmosfera. No organismo humano, o Cu é essencial, pois está associado a diversas enzimas e a processos fisiológicos importantes, como a respiração celular. Contudo, a exposição a concentrações elevadas pode causar distúrbios gastrintestinais, lesões hepáticas e renais, e, em alguns casos, ao desenvolvimento de câncer (Azevedo & Chasin, 2003; Almeida, 2013).

O Zn é um elemento comum na natureza, sendo encontrado no ar, no solo, na água e em alimentos. Na indústria, é largamente utilizado em diversos processos, como o revestimento de Fe e outros metais, a produção de ligas metálicas, baterias e moedas. Certos processos antrópicos podem elevar a concentração de Zn na atmosfera, incluindo mineração, purificação de Zn, Pb e Cd, produção de aço e queima de carvão e resíduos. No corpo humano, o Zn atua como cofator em mais de 200 enzimas. Sua deficiência pode provocar problemas no crescimento e atraso na maturidade sexual. O Zn apresenta toxicidade apenas em doses excessivas, podendo causar anemia, alterações pancreáticas, baixa fertilidade, além de problemas gastrintestinais, neurológicos e imunológicos (Azevedo & Chasin, 2003).

O Cd, por sua vez, é um elemento raro na crosta terrestre, ocorrendo normalmente associado a minérios de Zn, sendo um subproduto da produção desse metal. É utilizado na eletrodeposição, em ligas metálicas e na fabricação de pilhas e baterias, entre outros processos. Na atmosfera, o Cd pode ser proveniente de emissões industriais, queima de combustíveis fósseis ou erosão do solo. Em processos que envolvem temperaturas extremamente altas, como na indústria de Fe e aço, o Cd pode volatilizar e ser emitido na forma de vapor. Em processos de combustão, é normalmente liberado associado a partículas MP₁₀. Embora apresente propriedades físicas e químicas semelhantes às do Zn, os compostos de Cd são mais tóxicos, uma vez que este elemento não possui função biológica conhecida. Sua presença no organismo pode interferir no metabolismo, substituindo outros metais como Zn e Ca, e ocasionar fragilidade óssea, disfunções pulmonares, renais e, em casos extremos, câncer (Azevedo & Chasin, 2003).

O Pb é um elemento com relativa abundância na crosta terrestre e é utilizado em indústrias de pilhas e baterias, tintas e pigmentos, além da indústria bélica. O monitoramento de Pb em diferentes países tem mostrado uma tendência de redução de suas concentrações na atmosfera, resultado da diminuição do uso de gasolina aditivada com chumbo tetraetila, bem como do controle de outras fontes emissoras. O Pb não apresenta função fisiológica conhecida no corpo humano e se acumula principalmente no cérebro e nos ossos. A exposição a esse metal pode causar uma série de transtornos neurológicos, renais, cardiovasculares e gastrintestinais, além de paralisia, cegueira e câncer (Azevedo & Chasin, 2003).

Por fim, o As é um elemento presente no solo, na água, no ar e nos alimentos, tanto de forma natural quanto por influência da atividade humana. É comumente encontrado em minérios de Au, Ag, Co, Ni, Pb, Cu e Sb. Sua liberação na atmosfera ocorre por processos naturais e antrópicos, geralmente associados a grande desprendimento de calor, como fundições, usinas termelétricas, incêndios florestais e atividade vulcânica. O As pode estar presente no MP nos estados de oxidação As (III) e As (V), em compostos inorgânicos e/ou formas organometaloides. A exposição ocupacional ocorre principalmente pela inalação de partículas durante atividades de mineração, fundição de Cu, fabricação de semicondutores, produção e aplicação de agrotóxicos na madeira e na agricultura. Por não possuir função fisiológica conhecida no organismo humano, o As pode provocar efeitos diversos, incluindo inibição da respiração celular, alterações na síntese de heme e no metabolismo das porfirinas, problemas cardiovasculares, anemia e diferentes tipos de câncer, como de pele, pulmão, próstata e bexiga, além de formas raras, como angiossarcoma hepático (Azevedo & Chasin, 2003).

Técnicas analíticas para a determinação de elementos-traço

Na atmosfera, as concentrações de elementos-traço são extremamente baixas, exigindo técnicas analíticas capazes de medi-las de forma adequada. Diversos métodos podem ser empregados para investigar a presença desses elementos em amostras de MP, incluindo espectrometria de absorção atômica (AAS), espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES), espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) e voltametria de pulso diferencial (VPD) (Sastre, 2002; Wei & Yang, 2010; Mimura, 2016). Entre essas, as técnicas ICP-MS e ICP OES têm sido frequentemente empregadas devido à sua capacidade multi-elementar e aos

baixos limites de detecção e quantificação (Quiterio, 2004; Pereira, 2007; Loyola, 2009; Montoya-Mayor et al, 2013). No entanto, essas metodologias requerem equipamentos de alto custo e manutenção especializada.

Nesse contexto, a AAS destaca-se por ser uma técnica relativamente simples e de menor custo operacional, a qual tem sido utilizada na determinação de diversos elementos-traço. Na AAS, a quantidade de átomos neutros em estado fundamental e gasoso é medida pela absorção de energia radiante em um comprimento de onda característico do analito, empregando-se uma fonte de radiação adequada. Dessa forma, é possível determinar um elemento químico mesmo na presença de outros componentes em uma amostra complexa. Para isso, as amostras devem ser atomizadas, ou seja, decompostas em átomos, seja por meio de uma chama ou por atomização eletrotérmica em forno de grafite, entre outras formas (Welz, 1985; Harris, 2005).

A espectrometria de absorção atômica com chama (F AAS) é uma técnica analítica consolidada e empregada em laboratórios de pesquisa e aplicações práticas. Apresenta limites de detecção na faixa de mg L^{-1} , operação simples e alta frequência analítica, além de ser uma técnica seletiva, com exatidão e precisão adequadas. No entanto, requer grande volume de amostra para análise (Correia, 2003; Mimura, 2016; Mimura, 2017). Em contraste, a espectrometria de absorção atômica com forno de grafite (GF AAS) oferece elevada sensibilidade, com limites de detecção na faixa de $\mu\text{g L}^{-1}$, e exige menor quantidade de amostra para a análise. Porém, comparada à F AAS, a GF AAS possui menor frequência analítica (Uygur, 2010; Mimura, 2016).

Com o intuito de desenvolver métodos mais sensíveis e com menos interferências, a GF AAS passou por diversos avanços instrumentais ao longo dos anos, tornando os equipamentos mais robustos e incorporando uma série de inovações. Esse progresso culminou no estabelecimento das condições STPF (*Stabilized Temperature Platform Furnace*) em 1981. Entre essas condições, destacam-se: eletrônica adequada para permitir a integração do sinal transiente, elevada taxa de aquecimento do tubo de grafite, interrupção do fluxo de gás durante a atomização, uso da plataforma de L'vov, registro de sinais de absorbância em área e uso de modificadores químicos (Neto, 1996).

Na técnica GF AAS, é possível controlar parâmetros como temperatura e tempo ao longo de todas as etapas do programa de aquecimento: secagem, pirólise, atomização e limpeza. Na secagem, a amostra é aquecida a temperaturas próximas ao ponto de ebulição do solvente utilizado. Durante a pirólise, ocorre a eliminação dos componentes majoritários da matriz,

utilizando-se a maior temperatura possível sem perda do analito. Na etapa de atomização, a vazão de gás é interrompida e a absorbância do analito é medida. Para eliminar resíduos e evitar efeitos de memória, a limpeza do tubo é realizada em altas temperaturas. Durante todo o programa de aquecimento, tanto a temperatura quanto o tempo de cada etapa são relevantes: rampa de aquecimento lenta é utilizada na secagem e pirólise para garantir a volatilização da matriz sem projeções da amostra, enquanto uma rampa rápida na atomização aumenta a sensibilidade e prolonga a vida útil do tubo (Neto, 1996). O programa de aquecimento, especialmente as temperaturas de pirólise e atomização, deve ser cuidadosamente definido, pois cada elemento químico em uma determinada matriz possui temperaturas de pirólise e de atomização características (Magalhães, 1998; Silva, 2004; Mimura 2016; Mimura, 2017).

Preparo de amostras

Para análises ambientais de amostras sólidas, geralmente é necessária uma etapa prévia de preparo da amostra, a fim de extrair o analito para uma solução aquosa compatível com a técnica analítica de interesse (Mketo, 2016). Procedimentos convencionais baseados na digestão ácida da amostra, utilizando ácidos minerais sob aquecimento, são os mais comuns. Diversos ácidos, como HNO_3 , H_2SO_4 , HClO_4 , HF e HCl , podem ser utilizados isoladamente ou em combinação. O uso de água régia, mistura de HCl e HNO_3 (3:1 v/v), é uma prática comum no preparo de amostras ambientais (Sastre, 2002; Almeida, 2013). Entretanto, os métodos convencionais são demorados, envolvem múltiplas etapas de aquecimento em recipientes abertos e apresentam riscos de acidentes, perda de espécies voláteis e possíveis contaminações (Elik, 2005; Castilho, 2012; Mimura, 2016).

Novos métodos de preparo de amostras têm sido investigados com o objetivo de obter procedimentos mais rápidos e práticos, com menor consumo de amostras e reagentes, além de minimizar a geração de resíduos (Elik, 2005). A extração assistida por ultrassom tem se destacado como uma alternativa eficiente aos métodos convencionais. Ultrassons são ondas mecânicas que se propagam em qualquer meio material e que não são perceptíveis ao ouvido humano. Durante a extração assistida por ultrassom, ocorre a cavitação acústica, fenômeno que envolve a formação, crescimento e implosão de bolhas no líquido, produzindo ondas de choque e gerando temperaturas locais elevadas e gradientes de pressão (Korn, 2003; Krug, 2010; Bernalte, 2012). Esse fenômeno influencia processos químicos e físicos, fragmentando as partículas

do material e, quando combinado com ácidos fortes, aumenta o potencial de extração e homogeneização da solução (Lourdes, 2016; Mimura 2016). Banhos ultrassônicos, comuns em laboratórios de análise química, também podem ser utilizados no preparo de amostras, oferecendo vantagens como simplicidade, baixo custo, robustez, alta frequência analítica e operação em temperatura e pressão ambientes (Kazi, 2009; Mimura, 2017).

A extração assistida por micro-ondas também apresenta grande relevância. Micro-ondas são ondas eletromagnéticas que, apesar de possuírem energia insuficiente para quebrar ligações químicas, são absorvidas durante o preparo de amostras, provocando rotação e realinhamento de moléculas polares e íons em resposta ao campo eletromagnético. Isso provoca aquecimento do sistema, acelerando as reações químicas (Krug, 2010). Em fornos de micro-ondas, a amostra é submetida a altas temperaturas, geralmente em recipientes fechados e pressurizados, aumentando a eficiência das reações e permitindo o uso de menores volumes de reagentes. Além disso, sistemas fechados e pressurizados minimizam a perda de analitos voláteis e contaminações (Castilho, 2012; Shaltout, 2014; Welna, 2015; Muller, 2016; Mketi, 2016). Métodos de micro-ondas também permitem o uso de reagentes diluídos sem perda de eficiência na extração (Mimura, 2017).

Diversos procedimentos para preparo de amostras de MP têm sido relatados na literatura. Estudos envolveram digestão ácida convencional em chapa de aquecimento para amostras de PTS coletadas em filtros de microfibras de vidro e de MP₁₀ em filtros de quartzo, com análise posterior por ICP OES (Quiterio, 2004; Pereira, 2007; Loyola, 2009). Oliveira (2012) analisaram a fração insolúvel da deposição úmida em Araraquara, SP, após digestão ácida com água régia a 120 °C por 48 h, seguida de determinação dos elementos por ICP-MS. Mateus (2013) determinaram elementos-traço por ICP OES e ICP-MS em amostras (PTS e MP_{2,5}) coletadas na região metropolitana do Rio de Janeiro e em área rural (Seropédica, RJ), após extração com HNO₃.

Brait e Filho (2010) digeriram amostras de PTS em chapa de aquecimento utilizando HCl e HNO₃ concentrados. Tran (2012) realizaram extração de amostras de MP em filtros de politetrafluoretileno com mistura ácida (4,0 mL de HNO₃ e 1,0 mL de H₂O₂) a 200 °C em forno de micro-ondas. Magalhães (2010) extraíram amostras de PTS com água régia em forno de micro-ondas por 20 min. Montoya-Mayor (2013) realizaram a digestão com HNO₃, HF e HClO₄, seguida de análise por ICP-MS. Shaltout (2014) estudaram amostras de MP_{2,5} coletadas em filtros de policarbonato, com extração por

micro-ondas utilizando HNO_3 concentrado por 20 min para determinação de Cd, Cu, Ni e Pb por GF AAS. Castilho (2012) utilizaram 12,0 mL de água régia concentrada com 1 h de sonicação ou 20 min de aquecimento por micro-ondas para extração de amostras de MP coletadas em filtros de fibra de vidro, com posterior determinação de Cu, Mo e Sb por GF AAS.

Material Particulado Atmosférico em Juiz de Fora (MG)

Apesar do grande número de estudos sobre extração de amostras de MP, o desenvolvimento de novos métodos continua sendo relevante, principalmente para análises de rotina e monitoramento ambiental. O preparo das amostras é a etapa crucial de qualquer processo analítico, sendo normalmente o mais dispendioso em tempo e reagentes químicos. Portanto, é necessário estabelecer métodos analíticos simples, rápidos e de baixo custo, capazes de avaliar com precisão e exatidão a presença de elementos-traço em amostras de MP. Paralelamente, o monitoramento da concentração desses elementos na atmosfera é essencial para compreender seus impactos ambientais e sobre a saúde humana.

Na região de Juiz de Fora, MG, dados sobre a composição de MP ainda são escassos. Portanto, foi realizada uma caracterização inicial da atmosfera para gerar dados comparativos ao longo do tempo e para estimar riscos à população exposta. Para este estudo, realizado entre 2014 e 2016, foram coletadas amostras de MP em quatro pontos de Juiz de Fora utilizando coletores passivos, mensalmente, durante 24 meses conforme mostrado na Figura 1. O Ponto 1, localizado na Avenida Brasil, apresenta intenso fluxo de veículos pesados, como ônibus urbanos e interurbanos, carretas e caminhões. Já o Ponto 2, situado no Bairro Igrejinha, é uma área residencial próxima a uma importante indústria de Zn, com histórico de acidentes e contaminação industrial, incluindo elevados teores de Cd, Cu, Pb e Zn. O Ponto 3, na Universidade Federal de Juiz de Fora, caracteriza-se por menor tráfego de veículos, maior altitude (935 m) e presença de construções civis em andamento. Já o Ponto 4, na Avenida Presidente Itamar Franco, localiza-se na região central da cidade e apresenta intenso fluxo de veículos leves e ônibus urbanos.

O preparo das amostras investigou métodos alternativos à digestão em chapa de aquecimento, utilizando extração assistida por ultrassom e extração assistida por micro-ondas, visando a métodos simples, rápidos e econômicos. Ambos os métodos desenvolvidos apresentaram precisão adequada (RSD <10

%), exatidão satisfatória (recuperações entre 83 e 114 %), alta frequência analítica, tempo de preparo reduzido (~10 min) e baixo consumo de reagente (5,0 mL de água régia em única etapa em frascos fechados).

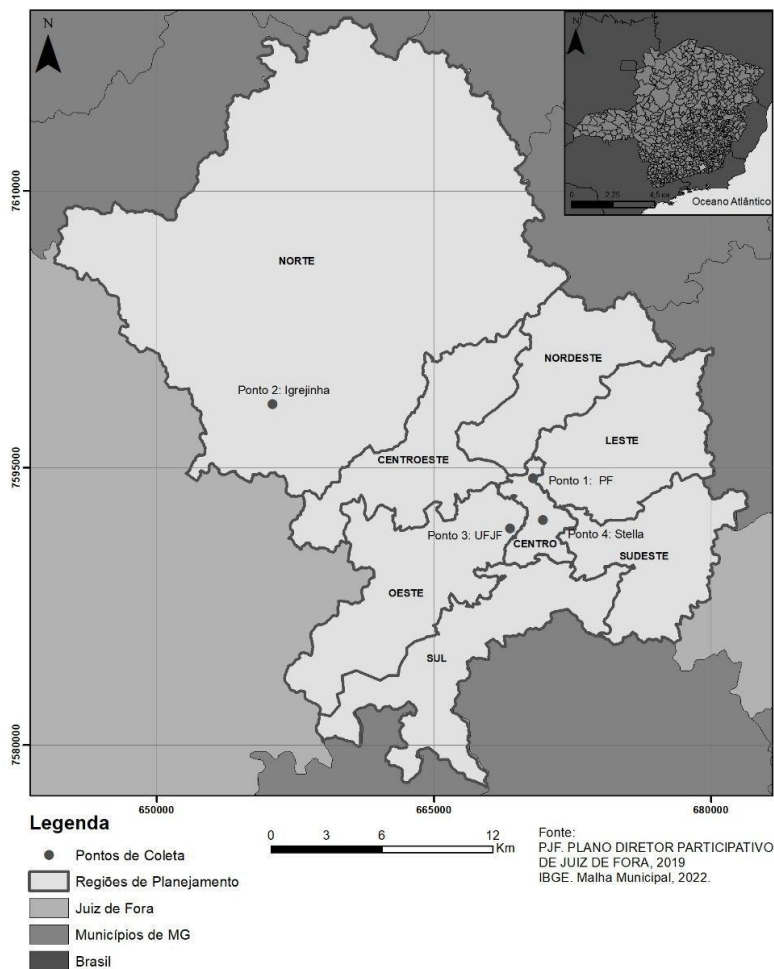
A determinação de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb e Zn foi realizada por F AAS e GF AAS, com otimização dos parâmetros instrumentais. As curvas analíticas apresentaram boa linearidade e os limites de detecção e quantificação foram compatíveis com as técnicas utilizadas. A caracterização das amostras de MP também incluiu difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de dispersão de energia (EDS). Observou-se variação no tamanho das partículas, menores no ponto 2 e maiores no ponto 1. Os dados de microanálise confirmaram a presença predominante de silicatos e óxidos metálicos (Fe e Al), consistentes com amostras típicas de MP.

A análise das amostras incluiu o cálculo do fator de enriquecimento, análise de componentes principais, análise de agrupamentos hierárquicos e correlação de Pearson, permitindo identificar as possíveis fontes de cada elemento em cada ponto. Os elementos de origem natural, como Al, Fe, Cr e Mn, estiveram presentes em altas concentrações na maioria das amostras, enquanto os elementos de origem antrópica, como As, Cu, Cd, Pb e Zn, foram associados a emissões industriais, veiculares e outras atividades humanas.

No ponto 2 (Bairro Igrejinha), foram observados valores médios elevados de Cd, Pb e Zn (146, 2.895 e 40.924 mg kg⁻¹, respectivamente), indicando influência direta da atividade industrial local. A presença destes elementos nos demais pontos sugere transporte de material particulado pelo vento a partir das fontes industriais da região Norte da cidade. Em resumo, as possíveis fontes dos elementos-traço presentes nas amostras de MP analisadas incluem a ressuspensão de poeira do solo, a poluição industrial proveniente de atividades como metalurgia e siderurgia, a queima de biomassa, a construção civil e a queima de combustíveis fósseis.

Este estudo apresentou um sistema de amostragem e métodos analíticos otimizados, permitindo determinação confiável de elementos-traço em MP com rapidez, baixo custo e baixo consumo de reagentes, fornecendo informações importantes sobre a composição da atmosfera de Juiz de Fora e as potenciais fontes de poluição na região. Os resultados foram publicados em dois artigos (Mimura, 2017; Mimura, 2020).

Figura 1: Pontos de coleta das amostras de material particulado (MP).



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Considerações finais

O estudo desenvolvido apresentou caráter inovador para a região de Juiz de Fora e contribuiu significativamente para pesquisas sobre poluição atmosférica, oferecendo novas perspectivas para o monitoramento e a caracterização de MP e de elementos-traço na atmosfera. A implementação de um sistema de amostragem passiva, associado a métodos analíticos otimizados,

permitiu a determinação confiável de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb e Zn, com rapidez, baixo custo e consumo reduzido de reagentes, fornecendo informações importantes sobre a composição atmosférica da cidade e as possíveis fontes de poluição.

O estudo também demonstrou a viabilidade de métodos alternativos de preparo de amostras, utilizando extração assistida por ultrassom e por micro-ondas, que se mostraram rápidos, precisos e eficientes, proporcionando alta frequência analítica e minimizando perdas e contaminações. Dessa forma, esta pesquisa não apenas contribui para o entendimento das características do MP em Juiz de Fora, como também estabeleceu uma base metodológica para estudos futuros, incluindo análises sazonais, validação do coletor passivo frente a coletores ativos, investigação da solubilidade e biodisponibilidade dos elementos, estudos envolvendo água de chuva e avaliação dos impactos da poluição atmosférica sobre a saúde da população, especialmente grupos mais vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas com problemas respiratórios.

Em síntese, os resultados obtidos reforçam a importância do monitoramento contínuo e detalhado da atmosfera, fornecendo subsídios para ações de mitigação da poluição e para a preservação da saúde pública e do meio ambiente, servindo como referência para pesquisas futuras na região e em contextos similares.

Agradecimentos

Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal de Juiz de Fora (PPGQ-UFJF), Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG, processo RED-00061-23), Cordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). A.M.S.M agradece a CAPES pela bolsa de doutorado concedida. E.O.L agradece à CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

Referências

- AHMED, M.; GUO, X.; ZHA, X. M. (2016). Determination and analysis of trace metals and surfactant in air particulate matter during biomass burning haze episode in Malaysia. **Atmospheric Environment**, v. 141, p. 219–229.
- ALMEIDA, T. S.; SANT'ANA, M. O.; CRUZ, J. M.; TORMEN, L.; CURTIUS, A. J.; ALVES, J. P. H.; GARCIA, C. A. B.; SANTOS, P. A.; ARAUJO, R. G. O. (2013). Optimization Method for Sequential Determination of Cu and Fe in Airborne

Particulate Matter Collected on Glass Fiber Filters by Slurry Sampling FAAS. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 24, n. 4, p. 700-706.

ARTAXO, P.; MARTINS, J. V.; YAMOASOE, M. A.; PROCÓPIO, A. S.; ANDREA, M. O.; GUYON, P.; GATTI, L. V.; LEAL, A. M. C. (2002). Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in Rondônia, Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 20, p. 1-14.

AZEVEDO, F. A.; CHASIN, A. A. M. (2003) **Metais**: gerenciamento da toxicidade. São Paulo: Atheneu.

BAIRD, C. (2002). **Química Ambiental**. 4 ed., São Paulo: Bookman.

BERNALTE, E.; SÁNCHEZ, M. C.; GIL, E. P. (2012). Determination of Mercury in indoor dust samples by ultrasonic probe microextraction and stripping voltammetry on gold nanoparticles-modified screen-printed electrodes. **Talanta**, v. 97, p. 187-192.

BRAIT, C. H. H.; FILHO, N. R. A. (2010). Desenvolvimento e Aplicação de Sistema Passivo de Coleta de Poluentes Atmosféricos para Monitoramento de Cd, Cr, Pb, Cu, Fe, Mn, Zn e Particulados Totais. **Química Nova**, v. 33, n. 1, p. 7-13.

CANHA, N.; ALMEIDA, S. M.; FREITAS, M. C.; TRANCOSO, M.; SOUSA, A.; MOURO, F.; WOLTERBEEK, H. T. (2014). Particulate matter analysis in indoor environments of urban and rural primary schools using passive sampling methodology. **Atmospheric Environment**, v. 83, p. 21-34.

CASTILHO, I. N. B.; WELZ, B.; VALE, M. G. R.; ANDRADE, J. B.; SMICHOWSKI, P.; SHALTOU, A. A.; COLARES, L.; CARASEK, E. (2012). Comparison of three different sample preparation procedures for the determination of traffic-related elements in airborne particulate matter collected on glass fiber filters. **Talanta**, v. 88, p. 689-695.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Disponível em: <<http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

CORREIA, P. R. M.; NOMURA, C. S.; OLIVEIRA, P. V. (2003). Espectrometria de Absorção Atômica Multielementar: Desafios e Perspectivas. **Revista Analytica**, n. 05, p. 52-59.

CRUZ, L. P. S.; CAMPOS, V. P. (2002). Amostragem passiva de poluentes atmosféricos. Aplicação ao SO₂. **Química Nova**, v. 25, n. 3, p. 406-411.

ELIK, A. (2005) Ultrasound assisted pseudo-digestion of street dust samples prior to determination by atomic absorption spectrometry. **Talanta**, v. 66, p. 882-888.

FANG, G. C.; CHANG, S. C.; CHEN, Y. C.; ZHUANG, Y. J. (2014) Measuring metallic elements of total suspended particulates (TSP), dry deposition flux, and dry deposition velocity for seasonal variation in central Taiwan. **Atmospheric Research**, v. 143, p. 107-117.

FORNARO, A. (2006) Águas de chuva: conceitos e breve histórico. Há chuva ácida no Brasil? **Revista USP**, n. 70, p. 78-87.

GUÉGUEN, F.; STILLE, P.; DIETZE, V.; GIERÉ, R. (2012) Chemical and isotopic properties and origin of coarse airborne particles collected by passive samplers in industrial, urban, and rural environments. **Atmospheric Environment**, v. 62, p. 631-645.

HARRIS, D. (2005) **Análise Química Quantitativa**. 6 ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial **Orientações Sobre Validação de Métodos de Ensaios Químicos**, 2007. Disponível em: <www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-8_02.pdf>. Acesso 21 jan. 2017.

JIRIES, A.; EL-HASAN, T.; MANASRAH, W. (2002). Qualitative evaluation of the mineralogical and chemical composition of dry deposition in the central and southern highlands of Jordan. **Chemosphere**, v. 48, p. 933–938.

KAZI, T. G.; JAMALI, M. K.; ARAIN, M. B.; AFRIDI, H. I.; JALBANI, N.; SARFRAZ, R. A.; ANSARI, R. (2009). Evaluation of an ultrasonic acid digestion procedure for total heavy metals determination in environmental and biological samples. **Journal of Hazardous Materials**, v. 161, p. 1391-1398.

KHAN, MD. F.; SHIRASUNA, Y.; HIRANO, K.; MASUNAGA, S. (2010) Characterization of PM_{2.5}, PM_{2.5-10} and PMN₁₀ in ambient air, Yokohama, Japan. **Atmospheric Research**, v. 96, p. 159–172.

KORN, M.; ANDRADE, M. V. A. S.; BORGES, S. S. (2003). Procedimentos Analíticos Assistidos por Ultrassom, **Revista Analytica**, n. 3, p. 34-39.

KRUG, F. J. (2010) **Métodos de preparo de amostras**. 1 ed., Piracicaba: Cena/USP.

LOYOLA, J.; ARBILLA, G.; QUITERIO, S. L.; ESCALEIRA, V.; BELLIDO, A. V. (2009). Concentration of Airborne Trace Metals in a Bus Station with a High Heavy-Duty Diesel Fraction. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 20, n. 7, p. 1343-1350.

LOYOLA, J.; QUITERIO, S. L.; ESCALEIRA, V.; MINHO, A. S. (2012) Trace metals in the urban aerosols of Rio de Janeiro city. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n. 4, p. 628-632.

LOURDES, A. M. F. O.; MIMURA, A. M. S.; SOUSA, R. A.; SILVA, J. C. J. (2016). Ultrasound-assisted extraction of Na, K, Cr, Pb and Zn in NPK fertilizers and determination by F AAS and F AES. **Atomic Spectroscopy**, v. 37, n. 3, p. 120-124.

MAGALHÃES, C. E. C.; ARRUDA, M. A. Z. (1998). Amostragem de suspensões: emprego da técnica na análise direta de amostras. **Química Nova**, v. 21, n. 4, p. 459-466.

MAGALHÃES, L. C.; NALINI JUNIOR, H. A.; LIMA, A. C.; COUTRIM, M. X. (2010). Determinação de Metais Traço no Material Particulado em Suspensão em Ouro Preto, Minas Gerais. **Química Nova**, v. 33, n. 3, p. 519-523.

MANAHAN, S. E. (1993). **Environmental Chemistry**. 7 ed. Londres: Lewis Publishers.

MARÍN, A.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, A.; BARBAS, C. (2001). Development and validation of extraction methods for determination of zinc and arsenic speciation in soils using focused ultrasound. Application to heavy metal study in mud and soils. **Analytica Chimica Acta**, v. 442, p. 305-318.

MATEUS, V. L.; MONTEIRO, I. L. G.; ROCHA, R. C. C.; SAINT'PIERRE, T. D.; GIODA, A. (2013). Study of the chemical composition of particulate matter from the Rio de Janeiro metropolitan region, Brazil, by inductively coupled plasma-mass spectrometry and optical emission spectrometry. **Spectrochimica Acta Part B**, v. 86, p. 131–136.

MIMURA, A. M. S.; FERREIRA, C. C. M.; SILVA, J. C. J. (2020). Evaluation of atmospheric particulate matter from an industrial area in Southeast Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 765.

MIMURA, A. M. S.; FERREIRA, C. C. M.; SILVA, J. C. J. (2017) Fast and feasible sample preparation methods for extraction of trace elements from deposited particulate matter samples. **Analytical Methods**, v. 9, p. 490–499.

MIMURA, A. M. S.; OLIVEIRA, M. A. L.; CIMINELLI, V. S. T.; SILVA, J. C. J. (2016) Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Cr, Cu, Zn, Cd, and Pb from Sediment, Followed by FAAS and GFAAS Analysis. **Journal of AOAC International**, v. 99, n. 1, p. 252-259.

MKETO, N.; NOMNGONGO, P. N.; NGILA, J. C. (2016). An innovative microwave-assisted digestion method with diluted hydrogen peroxide for rapid extraction of trace elements in coal samples followed by inductively coupled plasma-mass spectrometry, **Microchemical Journal**, v. 124, p. 201-208.

MONTOYA-MAYOR, R.; FERNÁNDEZ-ESPINOSA, A. J.; SEIJO-DELGADO, I.; TERNERO-RODRÍGUEZ, M. (2013). Determination of soluble ultra-trace metals and metalloids in rainwater and atmospheric deposition fluxes: A 2-year survey and assessment. **Chemosphere**, v. 92, p. 882–891.

MULLER, E. I. *et al.* (2016). Microwave-assisted wet digestion with H₂O₂ at high temperature and pressure using single reaction chamber for elemental determination in milk powder by ICP-OES and ICP-MS, **Talanta**, v. 156, p. 232-238.

NEIS, E. C.; MARIANI, R. L.; BARBOSA, A. M.; NOGUEIRA, J. S. (2008). Material particulado atmosférico e correlações com as variáveis meteorológicas e queimadas em Cuiabá, MT. **Ciência e Natura**, v. 30, n. 2, p. 43-56.

NETO, E. O. (1996). **Espectrofotometria de Absorção Atômica**. Belo Horizonte: UFMG.

NOWAK, D. J.; HIRABAYASHI, S.; BODINE, A.; GREENFIELD, R. (2014). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. **Environmental Pollution**, v. 193, p. 19-29.

OAKES, M. M.; BURKE, J. M.; NORRIS, G. A.; KOVALCIK, K. D.; PANCRAS, J. P.; LANDIS, M. S. (2016). Near-road enhancement and solubility of fine and coarse particulate matter trace elements near a major interstate in Detroit, Michigan. **Atmospheric Environment**, v. 145, p. 213-224.

OLIVEIRA, P. L.; FIGUEIREDO, B. R.; CARDOSO, A. A.; ANGÉLICA, R. S. (2013). Elementos traço em material particulado atmosférico de uma região agroindustrial do sudeste do Brasil. **Química Nova**, v. 36, n. 4, p. 533-539.

PEREIRA, P. A. P.; LOPES, W. A.; CARVALHO, L. S.; ROCHA, G. O.; BAHIA, N. C.; LOYOLA, J.; QUITERIO, S. L.; ESCALEIRA, V.; ARBILLA, G.; ANDRADE, J. B. (2007). Atmospheric concentrations and dry deposition fluxes of particulate trace metals in Salvador, Bahia, Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 41, p. 7837-7850.

QUEIROZ, P. G. M.; JACOMINO, V. M. F.; MENEZES, M. A. B. C. (2007). Composição Elementar do Material Particulado Presente no Aerossol Atmosférico do Município de Sete Lagoas, Minas Gerais. **Química Nova**, v. 30, n. 5, p. 1233-1239.

QUINÁIA, S. P.; NÓBREGA, J. A. (2000). Atomização eletrotérmica de crômio em forno de grafite: Um estudo crítico de fatores determinantes do desempenho analítico. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 11, n. 1, p. 87-98.

QUITERIO, S. L.; SILVA, C. R. S.; ARBILLA, G.; ESCALEIRA, V. (2004). Metals in airborne particulate matter in the industrial district of Santa Cruz, Rio de Janeiro, in an annual period. **Atmospheric Environment**, v. 38, p. 321-331.

RESOLUÇÃO CONAMA. **n. 3, de 28 de junho de 1990**. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/>. Acesso em: 5 jul. 2015.

ROCHA, G. O.; VASCONCELLOS, P. C.; ÁVILA, S. G.; SOUZA, D. Z.; REIS, E. A. O.; OLIVEIRA, P. V.; SANCHEZ-CCOYLLO, O. (2012). Seasonal Distribution of Airborne Trace Elements and Water-Soluble Ions in São Paulo Megacity, Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n.10, p. 1915-1924.

ROCHA, J. C.; ROSA, A., H.; CARDOSO, A. A. (2004). **Introdução à Química Ambiental**. Porto Alegre: Bookman.

SASTRE, J.; SAHUQUILLO, A.; VIDAL, M.; RAURET, G. (2002). Determination of Cd, Cu, Pb and Zn in environmental samples: microwave-assisted total digestion versus aqua regia an nitric acid extraction. **Analytica Chimica Acta**, v. 462, p. 59-72.

SHALTOUT, A. A.; BOMAN, J.; WELZ, B.; CASTILHO, I. N. B.; AL ASHKAR, E. A.; GAITA, S. M. (2014). Method development for the determination of Cd, Cu, Ni and Pb in PM_{2.5} particles sampled in industrial and urban areas of Greater Cairo, Egypt, using high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry. **Microchemical Journal**, v. 113, p. 4-9.

SILVA, A. M. C.; MATTOS, I. E.; FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; HACON, S. S. (2010). Material particulado (PM_{2.5}) de queima de biomassa e doenças respiratórias no sul da Amazônia brasileira. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 13, n. 2, p. 337-51.

SILVA, J. B. B. (2004). Comportamento da atomização eletrotérmica de ouro, prata, bismuto, cádmio, chumbo e estanho em soluções aquosas e em etanol, a partir de diferentes superfícies atomizadoras. **Química Nova**, v. 27, n.4, p. 528-535.

TAVARES, F. V. F.; ARDISSON, J. D.; RODRIGUES, P. C. H.; MACEDO, W. A. A.; JACOMINO, V. M. F. (2014). Characterization of iron in airborne particulate matter. **Hyperfine Interact**, 224, p. 109–119.

TAVARES, F. V. F.; BARRETO, A. A.; DUTRA, E. G.; JACOMINO, V. M. F. (2010). Estudo do processo de dispersão de emissões veiculares em uma microrregião de Belo Horizonte (MG) utilizando simulação numérica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 315-324.

TRAN, D. T.; ALLEMAN, L. Y.; CODDEVILLE, P.; GALLO, J. C. (2012). Elemental characterization and source identification of size resolved atmospheric particles in French classrooms. **Atmospheric Environment**, v. 54, p. 250-259.

UYGUR, N.; KARACA, F.; ALAGHA, O. (2010). Prediction of sources of metal pollution in rainwater in Istanbul, Turkey using factor analysis and long-range transport models. **Atmospheric Research**, v. 95, p. 55–64.

VANZ, A.; MIRLEAN, N.; BAISCH, P. (2003). Avaliação de poluição do ar por chumbo particulado: uma abordagem geoquímica. **Química Nova**, v. 26, n. 1, p. 25-29.

VIEIRA-FILHO, M. S.; LEHMANN, C.; FORNARO, A. (2015). Influence of local sources and topography on air quality and rainwater composition in Cubatão and São Paulo, Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 101, p. 200-208.

WEI, B.; YANG, L. (2010). A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. **Microchemical Journal**, v. 94, p. 99–107.

WELNA, M.; BURNECKA, J. B.; POPKO, M. (2015). Ultrasound- and microwave-assisted extractions followed by hydride generation inductively coupled plasma optical emission spectrometry for lead determination in geological samples. **Talanta**, v. 144, p. 953-959.

WELZ, B. (1985). **Atomic Absorption Spectrometry**, 2 ed., Neustad: VCH.

8- Estudos teórico e prático dos processos transitórios de carga e descarga de um tanque de gás comprimido

Marco Aurélio da Cunha Alves²⁸

Daniel de Almeida Fernandes²⁹

Apresentação

A Engenharia Mecânica encontra-se em constante transformação, impulsionada pelo avanço das tecnologias energéticas, pela busca por eficiência e pela crescente demanda por soluções sustentáveis. Nesse cenário, a compreensão de fenômenos transitórios — particularmente os processos de carregamento e descarregamento em sistemas pressurizados — ocupa posição central, tanto pela sua relevância científica quanto pelas inúmeras aplicações práticas que encontra.

Ao longo da história, estudos pioneiros de autores como John H. Horlock contribuíram de forma decisiva para o entendimento dos processos de transferência de massa e energia em turbomáquinas, motores de combustão interna e sistemas de armazenamento. Essas contribuições, além de estabelecerem fundamentos conceituais sólidos, abriram caminho para investigações experimentais e aplicações industriais que permanecem atuais e indispensáveis.

Nas últimas décadas, a emergência de novos vetores energéticos, como o hidrogênio, reforçou a importância do tema. A mobilidade sustentável, as normas internacionais de segurança e os desafios técnicos associados ao reabastecimento rápido de tanques pressurizados tornam ainda mais urgente a formação de engenheiros capazes de compreender profundamente os fenômenos termodinâmicos transitórios.

²⁸ Doutor em Eng. Mecânica. Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de Eng. Mecânica. *E-mail*: marco.alves@ufjf.br <https://orcid.org/0000-0002-6714-600X>

²⁹ Doutor em Eng. de Sistemas. Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de Energia Elétrica. *E-mail*: daniel.fernandes@ufjf.br

Este capítulo, ao propor uma abordagem teórica e experimental acessível para o estudo dos processos de carga e descarga de tanques de gás comprimido, procura integrar tradição e inovação. Por meio de uma exposição clara e fundamentada, oferece não apenas um recurso didático para estudantes de Engenharia Mecânica, mas também uma referência de consulta para pesquisadores e profissionais da área.

Mais do que apresentar modelos e experimentos, este capítulo convida seus leitores a refletir sobre a evolução dos conceitos termodinâmicos e sobre sua aplicação em desafios contemporâneos, demonstrando que a formação técnica de excelência deve caminhar lado a lado com o desenvolvimento das capacidades crítica e investigativa.

Dedicatória

Aos estudantes, que com sua curiosidade e perseverança dão sentido ao esforço acadêmico; aos orientadores e professores, que com dedicação e generosidade iluminam o caminho da pesquisa e do ensino; e aos colegas de laboratório, cujo entusiasmo coletivo torna possível transformar desafios técnicos em conquistas compartilhadas.

Símbolos

c_p	Calor específico a pressão constante [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
c_v	Calor específico a volume constante [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
DTC	Diferença de Temperatura no processo de Carga [K] ou [°C]
DTD	Diferença de Temperatura no processo de Descarga [K] ou [°C]
$e; E$	Energia por unidade de massa [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]; energia [J]
g	Aceleração da gravidade ($g \approx 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)
$h; H$	Entalpia por unidade de massa [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]; entalpia [J]
k	Razão de calores específicos: c_p/c_v [adimensional]
m	Massa [kg]
$\dot{m}$	Vazão em massa ou vazão mássica [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]
p	Pressão [Pa]
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor [W]

R	Constante do gás [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
RP	Razão de Pressões [adimensional]
t	Tempo [s]
T	Temperatura absoluta [K]
$u; U$	Energia interna por unidade de massa [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]; energia interna [J]
UR	Umidade Relativa do ar [%]
$v; V$	Volume específico [$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$]; volume [m^3]
W	Trabalho [J]
$\dot{W}$	Potência [W]
Z	Altura [m]

Subscritos

amb	Ambiente
c	Carga
e	Estado do gás entrando no tanque
i	Estado inicial
s	Estado do gás saindo do tanque
T	Estado do gás no interior do tanque
0	Propriedade de estagnação

Introdução

No campo da Engenharia Mecânica, a compreensão aprofundada dos processos transitórios de carga e descarga de tanques de gases desempenha um papel essencial na otimização de diversos sistemas e aplicações. Entre os pioneiros nesse tema destaca-se John Harold Horlock, cuja contribuição foi notável nas áreas de termodinâmica, mecânica dos fluidos, turbomáquinas e geração de energia por turbinas a gás (Denton & Gostelow, 2016). Em Horlock & Woods (1965), apresentou uma análise abrangente dos processos de carregamento e descarregamento de tanques, ressaltando sua relevância em aplicações como motores de combustão interna — especialmente os de dois tempos —, compressores de ar, armazenamento de energia em ar comprimido e processos industriais em plantas químicas.

A importância contemporânea desses estudos ganha destaque diante do avanço das tecnologias de mobilidade a hidrogênio, apontadas como elemento central na transição energética e na descarbonização do setor de transporte (Caponi *et al.*, 2023). O desempenho dos sistemas de abastecimento de hidrogênio, em particular, está diretamente associado à eficiência e à segurança dos processos de compressão e transferência de gás. Revisões recentes na literatura evidenciam desafios técnicos relacionados ao aquecimento adiabático durante o reabastecimento rápido, que pode gerar estresses térmicos e comprometer a integridade estrutural dos tanques (Sdanghi et al., 2019; Dutton & Coverdill, 1997). Nesse contexto, normas técnicas como a SAE J2601_202005 (SAE International, 2020), que estabelece protocolos de abastecimento para veículos leves de superfície que utilizam hidrogênio gasoso, estabelecem critérios rigorosos para taxas de transferência e limites de temperatura, justamente para mitigar riscos de falhas mecânicas em condições críticas.

Do ponto de vista experimental e didático, Dutton & Coverdill (1997) investigaram o escoamento transitório por meio de experimentos envolvendo tanto a descarga de um recipiente pressurizado quanto o carregamento de um recipiente inicialmente despressurizado. Seus resultados, obtidos a partir da comparação entre soluções teóricas e medições experimentais, reforçam o valor pedagógico da análise de processos não estacionários, tradicionalmente menos abordados em cursos de graduação em Engenharia Mecânica.

Embora a termodinâmica figure entre os pilares da formação em Engenharia Mecânica, a abordagem clássica frequentemente se concentra em processos em regime permanente, deixando lacunas no entendimento de fenômenos transitórios. O modelo de regime estacionário proposto por Borgnakke & Sonntag (2018) fornece uma primeira aproximação simplificada, mas negligencia variações temporais relevantes das propriedades termodinâmicas — regime transitório. Essa limitação evidencia a necessidade de aprofundar o estudo dos processos transitórios, tanto para fins acadêmicos quanto para aplicações práticas.

Diante desse contexto, o presente capítulo tem como objetivo propor uma demonstração teórica e experimental, simples e de baixo custo, dos processos de carga e descarga de um tanque de ar comprimido. Busca-se, assim, contribuir para o ensino de termodinâmica ao proporcionar aos estudantes de Engenharia Mecânica uma compreensão ampliada dos fenômenos transitórios, complementando os conteúdos tradicionalmente abordados em sala de aula.

Processos transitórios de carga e descarga de um tanque de gás

Os processos transitórios de carga e descarga de um tanque de gás comprimido podem ser analisados rigorosamente utilizando as leis da termodinâmica, formuladas em forma diferencial. Essa abordagem, conforme estabelecido por Horlock & Woods (1965), possibilita modelar a evolução temporal das propriedades internas do sistema, tais como pressão, temperatura e energia interna. Sob a suposição de que o gás se comporta como um gás ideal, sem troca de calor e trabalho mecânico, é possível desenvolver modelos matemáticos ideais que descrevem com precisão a dinâmica desses processos.

Os processos termodinâmicos de carga e descarga de um tanque de gás comprimido são tratados pelas leis clássicas da termodinâmica, leis essas enunciadas de acordo com a formulação realizada por Borgnakke & Sonntag (2018).

Considerando o tanque como um volume de controle com uma entrada e uma saída apenas, a equação da conservação da massa, a chamada equação da continuidade, é representada matematicamente por

$$\frac{dm_T}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (1)$$

Eq. (1) estabelece que a taxa de variação temporal da massa do gás no tanque (dm_T/dt) é igual a vazão de massa que entra no tanque ($\dot{m}_e$) menos a vazão de massa que sai do tanque ($\dot{m}_s$).

A equação da primeira lei da termodinâmica, ou seja, da conservação da energia, aplicada ao tanque, como um volume de controle, é representada matematicamente por

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{Q}_T - \dot{W}_T + \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) - \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s \right) \quad (2)$$

Eq. (2) estabelece que a taxa de variação temporal da energia no tanque (dE_T/dt) é devida às taxas de transferência de calor ($\dot{Q}_T$) e de realização de trabalho ($\dot{W}_T$), e também às vazões de energia totais tanto entrando no tanque ($\dot{m}_e(h_e + 0,5V_e^2 + gZ_e)$) quanto saindo dele ($\dot{m}_s(h_s + 0,5V_s^2 + gZ_s)$). Nas duas últimas expressões, os termos envolvidos são a entalpia (h), a energia cinética ($0,5V^2$) e a energia potencial (gZ) dos escoamentos de entrada e saída.

Para o caso particular de estabelecimento de modelos termodinâmicos ideais dos processos transitórios de carga e descarga de um tanque de gás comprimido, são necessárias as seguintes considerações em relação à Eq. (2):

- a. O tanque não possui energias cinética e potencial, portanto a energia do tanque (E_T) se resume à energia interna (U_T);
- b. Os processos de carga e descarga do tanque não envolvem o trabalho realizado por um eixo, nem trabalho elétrico ou devido ao movimento de uma superfície de controle, de modo que o termo $\dot{W}_T = 0$ W;
- c. Assume-se que os processos de carga e descarga do tanque ocorrem suficientemente rápido, de tal maneira que transferências de calor podem ser desprezadas. Dessa forma, o termo $\dot{Q}_T = 0$ W, caracterizando o processo como adiabático;
- d. Durante os dois processos, não existem variações de energia potencial; portanto, Z_e e Z_s são alturas iguais e referenciadas como zero;
- e. Utiliza-se o conceito de entalpia de estagnação, muito utilizado na área da mecânica dos fluidos, dado matematicamente por $h_0 = h + 0,5V^2$;
- f. O gás é modelado como um gás perfeito, sob a hipótese adicional de apresentar calor específico constante. Desta forma, a entalpia (h) e a entalpia de estagnação (h_0) são dadas por $h = c_p T$ e $h_0 = c_p T_0$, onde c_p é o calor específico a pressão constante, T é a temperatura estática e $T_0 = T + 0,5V^2/c_p$ é a temperatura de estagnação;
- g. A energia interna (u) é dada por $u = c_v T$, onde c_v é o calor específico a volume constante.

Dadas as considerações acima, a Eq. (2) finalmente resulta

$$\frac{d(m_T c_v T_T)}{dt} = c_p T_{0,e} \dot{m}_e - c_p T_{0,s} \dot{m}_s \quad (3)$$

Considerando, para o caso de um gás perfeito, a razão entre os calores específicos $k = c_p/c_v$, obtém-se

$$\frac{d(m_T T_T)}{dt} = k(T_{0,e} \dot{m}_e - T_{0,s} \dot{m}_s) \quad (4)$$

As Eqs. (1) e (4) foram desenvolvidas para o caso de entrada e saída simultâneas de gás no tanque. A seguir, as equações serão aplicadas para os casos específicos de carga, quando não existe saída de gás do tanque, e de descarga, quando não existe entrada de gás no tanque.

Processo transitório de carga de um tanque de gás comprimido

Considerando o processo transitório de carga de um tanque de gás comprimido, tanque esse de volume V e massa de gás em seu interior m_T , e tratando o tanque como um volume de controle com única entrada de massa, massa essa vinda de um reservatório infinito, com vazão mássica $\dot{m}_e$ e entalpia de estagnação $h_{0,e}$, da equação da continuidade (Eq. (1)), obtém-se

$$\frac{dm_T}{dt} = \dot{m}_e \quad (5)$$

Então resulta da equação da conservação da energia (Eq. (4))

$$\frac{d(m_T T_T)}{dt} = k T_{0,e} \dot{m}_e \quad (6)$$

Substituindo $\dot{m}_e$, obtida da Eq. (5), na Eq. (6), obtém-se

$$\frac{d(m_T T_T)}{dt} = k T_{0,e} \frac{dm_T}{dt} \quad (7)$$

E, fazendo a separação de variáveis da equação diferencial, resulta

$$\frac{1}{m_T} \frac{dm_T}{dt} = \frac{1}{(k T_{0,e} - T_T)} \frac{dT_T}{dt} \quad (8)$$

Considerando que, no instante inicial de carga do tanque, a temperatura e a pressão internas sejam $T_{T,i}$ e $P_{T,i}$, respectivamente, e que, em qualquer instante de tempo, a massa de gás no tanque seja $m_T = (P_T V)/(R T_T)$, onde P_T é a pressão no interior do tanque e R é a constante do gás, a solução da Eq. (8) resulta na razão

$$\frac{T_T}{T_{0,e}} = \frac{k}{\frac{P_{T,i}}{P_T} \left(k \frac{T_{0,e}}{T_{T,i}} - 1 \right) + 1} \quad (9)$$

O resultado acima está confirmado em Horlock & Woods (1965).

Para destacar a importância do resultado teórico dado pela Eq. (9), pode-se considerar o caso dos veículos movidos a célula a combustível de hidrogênio — *Fuel Cell Electric Vehicles* (FCEV) —, que utilizam tanques de armazenamento de hidrogênio comprimido a altas pressões, para maximizar a autonomia do veículo e reduzir o volume ocupado pelo gás. Segundo o padrão internacional de abastecimento SAE J2601, que estabelece uma pressão de enchimento de 35 MPa (aproximadamente 345 atm) para tanques de veículos pesados, a temperatura máxima permitida do gás dentro do tanque durante o

abastecimento é de 85 °C. Para evitar atingir tal limite, o hidrogênio é pré-resfriado a -20 °C para ser injetado no tanque do veículo. O pré-resfriamento compensa o aquecimento causado pela compressão e mantém o processo de enchimento dentro dos limites de segurança estabelecidos para o material do tanque. A duração típica do processo de abastecimento é de 3 a 5 minutos.

Voltando à Eq. (9), por mais alta que seja a pressão de carregamento do tanque (P_T) em relação à pressão inicial no tanque ($P_{T,i}$), a razão $P_{T,i}/P_T$ tende a zero ao longo do tempo e a temperatura máxima (T_T) atinge um valor igual a $kT_{0,e}$. Como para o hidrogênio $k \approx 1,409$, e o valor máximo de T_T , segundo os padrões internacionais de abastecimento, é igual a 356 K (aproximadamente 83 °C), resulta que a temperatura máxima de abastecimento é $T_{0,e} \approx 356/1,409 \approx 253$ K (aproximadamente -20 °C), temperatura essa também estabelecida pelos mesmos padrões internacionais.

Processo transitório de descarga de um tanque de gás comprimido

Considere inicialmente uma massa de gás m_T ocupando um tanque de volume V , a uma pressão P_T e à temperatura T_T . Essa massa de gás é descarregada para um ambiente onde a pressão é P_s . Como o processo de descarga do tanque possui natureza transitória, e tratando o tanque como um volume de controle com uma única saída e com vazão mássica $\dot{m}_s$, da equação da continuidade (Eq. (1)), obtém-se

$$\frac{dm_T}{dt} = -\dot{m}_s \quad (10)$$

Então resulta da equação da conservação da energia (Eq. (4))

$$\frac{d(m_T T_T)}{dt} = -kT_{0,s} \dot{m}_s \quad (11)$$

Substituindo $\dot{m}_s$, obtida da Eq. (10), na Eq. (11), obtém-se

$$\frac{d(m_T T_T)}{dt} = kT_{0,s} \frac{dm_T}{dt} \quad (12)$$

De acordo com Horlock & Woods (1965), considerando que o processo de descarga do tanque seja adiabático reversível, portanto isentrópico, a temperatura total do gás de saída é igual à temperatura dentro do tanque, ou seja, $T_{0,s} = T_T$. Assim, reescrevendo a Eq. (12) convenientemente, obtém-se

$$\frac{d(m_T T_T)}{dt} = kT_T \frac{dm_T}{dt} \quad (13)$$

Considerando que, no instante inicial de descarga, as condições no interior do tanque sejam $T_{T,i}$, $P_{T,i}$ e $m_{T,i}$, e que, em qualquer instante de tempo, a massa de gás no tanque é dada por $m_T = (P_T V)/(RT_T)$, onde P_T é a pressão no interior do tanque e R é a constante do gás, a solução da Eq. (13) é

$$\frac{T_T}{T_{T,i}} = \left(\frac{P_T}{P_{T,i}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (14)$$

O resultado acima também está confirmado em Horlock & Woods (1965). Deve-se notar que a Eq. (14) é similar àquela de um gás perfeito passando por um processo de expansão adiabático reversível (isentrópico), como já era de se esperar, dada a consideração da temperatura total do gás de saída ser igual à temperatura dentro do tanque.

De acordo com a Eq. (14), o processo de descarga de um tanque de gás comprimido possui uma potencial capacidade de refrigeração. Se a temperatura inicial do gás comprimido for a temperatura ambiente, então, no processo de descarga do tanque, a temperatura total de saída do gás será inferior à temperatura ambiente, e esse gás de descarga pode ser utilizado para condicionar um ambiente.

Experimento de carga e descarga sequenciais de um tanque de ar

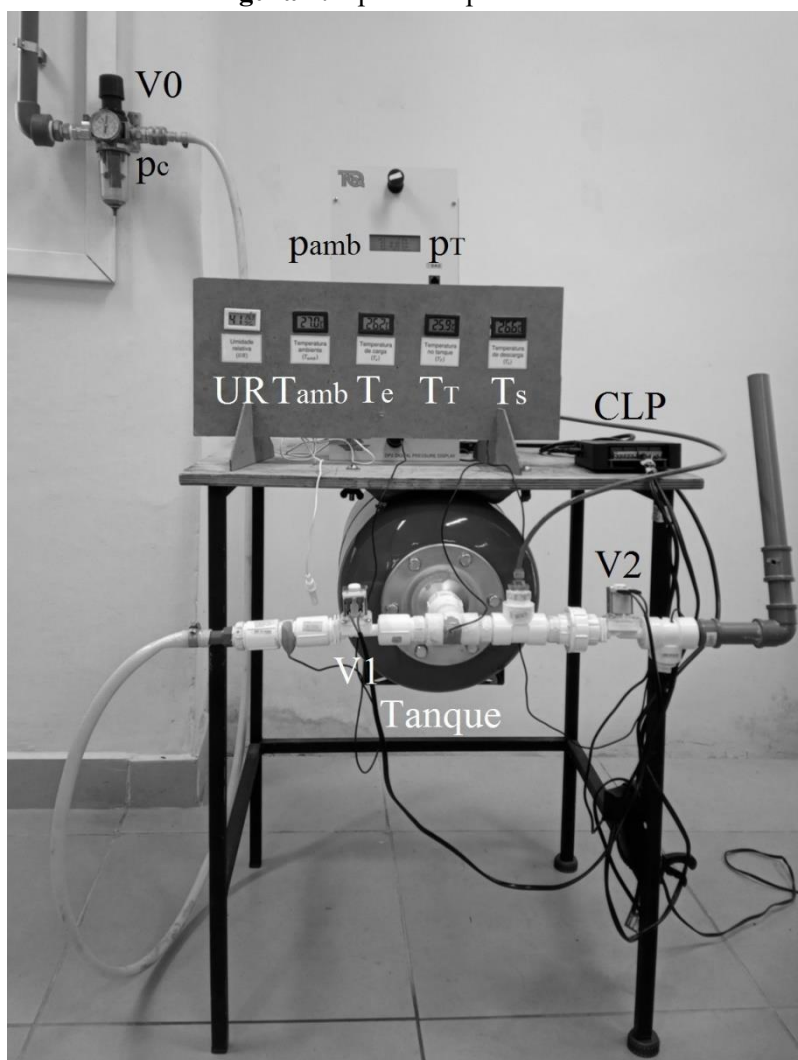
Na área de Ciências Térmicas da Engenharia Mecânica, como é de praxe, primeiro os modelos ideais das Máquinas Térmicas — por exemplo, as turbinas a gás e os motores Diesel e Otto — são estudados, e depois as curvas características dessas máquinas são levantadas experimentalmente, com o objetivo de comparar e otimizar, se necessário, o que é real, tendo como horizonte o que é ideal. Este capítulo segue essa praxe, uma vez que os modelos teóricos dos processos de carga e descarga de um tanque de gás já foram estabelecidos anteriormente e agora serão levantadas as curvas características de um aparato experimental, onde ocorrem os processos de carga e descarga de um tanque de ar comprimido.

Optou-se por uma abordagem experimental economicamente acessível para o estudo dos processos de carga e descarga de tanques de ar comprimido, buscando oferecer um recurso didático e prático para estudantes, pesquisadores e profissionais da área da Engenharia Mecânica. Diante desse contexto, é feita uma demonstração experimental, simples e de baixo custo, dos processos de carga e descarga simultâneas de um tanque de ar comprimido.

Aparato experimental

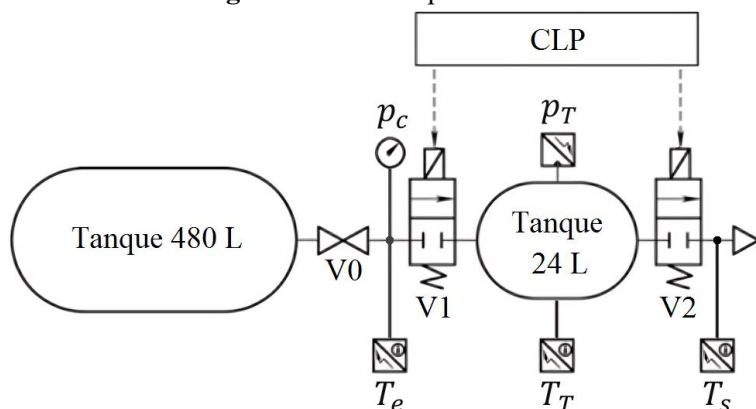
A Figura 1 mostra uma fotografia do aparato experimental construído no Laboratório de Ciências Térmicas e Hidráulica (LCTH), um dos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da UFJF, utilizado por docentes e discentes do curso de graduação em Engenharia Mecânica. A Figura 2 mostra um diagrama esquemático do circuito pneumático do aparato experimental. Os componentes são descritos na sequência.

Figura 1: Aparato experimental.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 2: Circuito pneumático.



Fonte: Autoria própria (2025).

O ar é comprimido por um compressor de ar Schulz, modelo MAX MSW 60/425, e armazenado em um tanque de 480 litros — componentes que não aparecem na Figura 1 e operam isotermicamente. Saindo do reservatório de armazenamento, o ar comprimido passa por um filtro regulador de pressão com manômetro (V0) da Bel Air, modelo FRM2400, entrada de ½”.

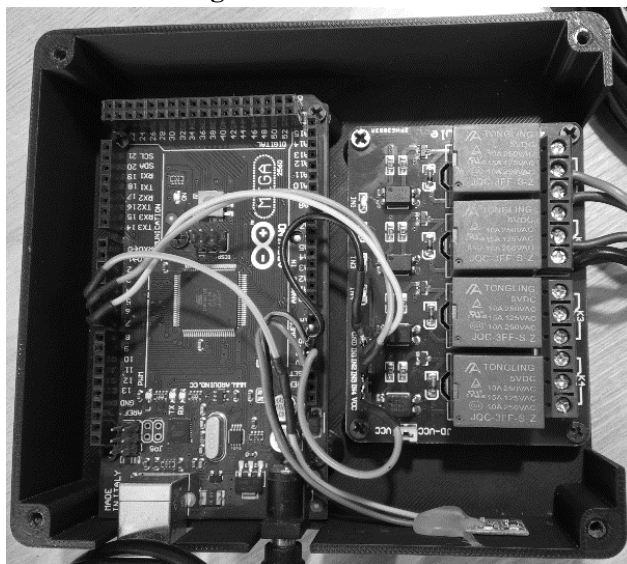
O ar comprimido segue para o tanque de pressão da Claw, modelo WM TH-24L, 24 litros, através de uma válvula solenoide (V1) da Nascimetal, modelo VA 04, ¾”, 180°, 110 V, que controla o processo de carga, comandada por um controlador desenvolvido exclusivamente para equipar o aparato experimental. O processo de descarga do tanque é controlado por outra válvula solenoide (V2), idêntica à primeira, também comandada pelo controlador.

O controlador (CLP), mostrado na Figura 3, é construído em torno de uma placa Arduino Mega 2560 Rev3 e um módulo de relés, e encapsulado em uma caixa feita de polímero termoplástico ABS através de impressão 3D. Ele é responsável por automatizar a execução cíclica, além de controlar a duração, dos processos de carga, armazenamento e descarga do tanque. Os tempos de duração são ajustados diretamente no código que é carregado na placa Arduino.

A temperatura de carga do ar (T_e), a temperatura do ar dentro do tanque (T_T) e a temperatura do ar de descarga (T_s), são medidas por termômetros digitais de baixo custo, resistentes à umidade, faixa de medição de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ e com mostradores de LCD para montagem em painel.

A pressão do ar dentro do tanque (p_T) é medida por um manômetro digital, enquanto a pressão de carga do ar (p_c) é medida pelo manômetro incorporado ao filtro regulador de pressão V0.

Figura 3: Controlador.



Fonte: Autoria própria (2025).

Medições adicionais são a Umidade Relativa (UR) e a temperatura do ar ambiente (T_{amb}), ambas medidas por um termo-higrômetro, além da pressão ambiente (p_{amb}), medida por um barômetro digital.

Metodologia experimental

Foi estabelecido um ciclo de execução sequencial dos processos de carga, armazenamento e descarga do tanque de ar comprimido. A seguir, são descritos os passos que compõem o experimento.

1. De início, são anotadas a temperatura ambiente (T_{amb}), a umidade relativa do ar (UR) e a pressão ambiente (p_{amb});
2. A pressão desejada de fornecimento de ar comprimido (p_c) para o processo de carga é ajustada no filtro regulador de pressão (V0);
3. O controlador comanda a abertura da válvula solenoide de carga (V1); têm início os processos cíclicos de carga, armazenamento e descarga do tanque;
4. O período de carga dura 20 segundos, controlado pelo controlador, e, durante o processo de carga, a temperatura do ar de carga (T_e) é observada;

5. Ao término do período de carga, a válvula solenoide V1 é fechada, comandada pelo controlador;
6. Tem início imediato, então, o período de armazenamento. Nele, o tanque, totalmente isolado, permanece carregado por 20 segundos e, nesta condição, a temperatura (T_T) e a pressão (p_T) dentro do tanque são observadas. A duração do período de armazenamento é controlada pelo controlador;
7. Inicia-se imediatamente o processo de descarga do tanque, com a abertura da válvula solenoide de descarga (V2), comandada pelo controlador, que permanece aberta por 10 segundos;
8. Ao final do período de descarga, a válvula solenoide V2 é fechada, comandada pelo controlador, e a temperatura do ar de descarga (T_s) é observada;
9. Os processos cíclicos de carga, armazenamento e descarga do tanque reiniciam imediatamente, retornando ao passo 3;
10. Após vários ciclos de repetição contínua dos processos, quando se observa que as temperaturas estabilizam, temperaturas e pressão são anotadas e, para obtenção de novas medidas, retorna-se ao passo 1;
11. A pressão de carga do ar comprimido (p_c) é ajustada a um valor máximo de maneira que a temperatura do ar de descarga (T_s) não seja muito inferior a 0 °C para evitar o congelamento da umidade presente no ar na descarga.

Os processos sequenciais de carga e descarga de um tanque de ar comprimido são abordados teoricamente em Horlock & Woods (1965) e Xu et al. (2021). No tratamento teórico, os tempos de permanência (10 a 20 segundos) são desconsiderados. Um dos motivos para que esses tempos sejam estabelecidos experimentalmente é permitir leituras estáveis de temperatura e pressão. Já a finalização rápida do processo de descarga, com início imediato do processo de carga — fechamento de V2 e imediata abertura de V1 —, ocorre para garantir que a temperatura de descarga (T_s) seja a mesma de dentro do tanque no início do processo de carga. O aumento dos tempos de permanência permite uma maior troca de calor do ar dentro do tanque com o ar ambiente, o que afasta mais as condições do processo experimental daquelas idealizadas no processo teórico. Como os processos de compressão e armazenamento do ar são isentrópicos, as temperaturas ambiente e de alimentação são iguais, ou seja, $T_{amb} = T_e$.

Tratamento dos dados medidos

Com o intuito de levantar as curvas características do aparato experimental, no que tange aos processos sequenciais de carga e descarga de ar comprimido, as temperaturas e pressões medidas são correlacionadas, de maneira a gerar parâmetros adimensionais, portanto independentes das unidades de medida adotadas, bem como generalizados com relação às condições ambientes em que os experimentos são realizados.

O primeiro parâmetro adimensional gerado, por ser o principal parâmetro independente, é a Razão de Pressões (RP), dada por

$$RP = \frac{p_T + p_{amb}}{p_{amb}} \quad (15)$$

Nota: a pressão p_T medida é manométrica, portanto deve ser somada à pressão ambiente (p_{amb}) para se obter a pressão absoluta.

Quanto às temperaturas finais nos processos de carga e descarga, elas não são consideradas diretamente, mas sim as respectivas diferenças entre cada uma delas e a temperatura do ar comprimido de carga (T_e). Para tornar tais diferenças de temperatura adimensionais, elas devem ser divididas pela temperatura do ar comprimido de carga, temperatura essa que é referenciada à temperatura de 288,15 K (15 °C). São apresentadas abaixo as expressões das diferenças de temperatura nos processos de carga e descarga.

A Diferença de Temperatura no processo de Carga (DTC) é dada por

$$DTC = \frac{T_T - T_e}{\left(\frac{T_e}{288,15}\right)} = 288,15 \left(\frac{T_T - T_e}{T_e}\right) \quad (16)$$

enquanto a Diferença de Temperatura no processo de Descarga (DTD) é dada por

$$DTD = \frac{T_s - T_e}{\left(\frac{T_e}{288,15}\right)} = 288,15 \left(\frac{T_s - T_e}{T_e}\right) \quad (17)$$

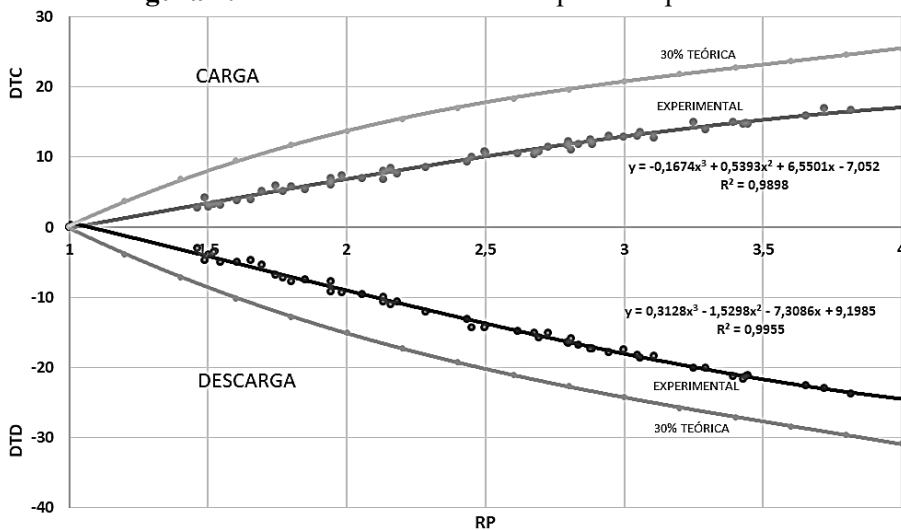
Vale destacar que o tratamento de dados utilizado foi efetuado a partir da observação direta dos resultados experimentais obtidos, sendo o tratamento que apresentou o melhor resultado. A técnica aqui empregada guarda alguma similaridade com o tratamento de dados normalmente efetuado a partir de ensaios de turbinas a gás.

Resultados experimentais

Seguindo o procedimento estabelecido na seção “Metodologia experimental”, com o intuito de obter as curvas características do aparato experimental construído, foram levantados 55 pontos com temperatura do ar de carga (T_e) variando entre 17 °C e 20 °C e pressão ambiente (p_{amb}) variando entre 921 mbar e 931 mbar.

As curvas características do aparato experimental — DTC vs. RP e DTD vs. RP — são apresentadas na Figura 4. Também constam nessa figura as curvas características do processo ideal, porém os valores mostrados nas curvas correspondem a apenas 30% dos valores ideais de DTC e DTD para que seja permitida uma comparação visual mais clara das curvas.

Figura 4: Curvas características do aparato experimental.



Fonte: Autoria própria (2025).

A partir dos dados medidos, foram traçadas duas linhas de tendência, cujas equações são apresentadas a seguir.

$$DTC = -0,1674(RP)^3 + 0,5393(RP)^2 + 6,5501(RP) - 7,0520 \quad (18)$$

$$DTD = 0,3128(RP)^3 - 1,5298(RP)^2 - 7,3086(RP) + 9,1985 \quad (19)$$

A partir dos resultados experimentais, as Eqs. (18) e (19) descrevem matematicamente as curvas características do aparato experimental, ou seja, a partir dessas curvas é possível determinar DTC e DTD , dada uma RP . Ou, ao contrário, por exemplo, a partir de uma DTD desejada, a RP pode ser ajustada no filtro regulador de pressão (V0) para obtenção dessa DTD desejada.

Discussão dos resultados

Vale observar que as curvas características experimentais obtidas são válidas para a configuração específica do atual aparato experimental. Qualquer modificação na configuração dele, e as curvas características serão alteradas.

As Eqs. (18) e (19) descrevem muito bem as tendências experimentais, pois todos os coeficientes de determinação (R^2) dos modelos de regressão lineares são próximos a 0,99, indicando excelentes correlações entre os dados. Isso indica que o tratamento dos dados medidos, proposta para a obtenção das Eqs. (15) a (17), é adequado e que, apesar dos termômetros digitais de medida das temperaturas serem de baixo custo, com grandes incertezas de medição, os erros experimentais obtidos são aceitáveis.

A máxima RP ajustada nos experimentos foi igual a 4. Portanto, as curvas características obtidas valem somente para a faixa $1 \leq RP \leq 4$. De acordo com essas curvas, aumentando o valor da RP , os valores absolutos de DTC e DTD aumentam. Esse valor máximo da RP foi estabelecido pelo fato de os experimentos terem sido realizados durante o inverno e a temperatura mínima de descarga ter sido mantida por volta de 0°C . Experimentos realizados durante o verão permitem ajustar valores maiores para a RP .

Comparando as curvas características teóricas e experimentais, verifica-se que os valores de DTC e DTD experimentais estão abaixo dos valores teóricos. Com a RP igual a 4, a DTC experimental é cerca de apenas 20% da DTC teórica, enquanto a DTD experimental é cerca de apenas 24% da DTD teórica. Para RP menores, os percentuais são ainda menores. Os valores experimentais menores já eram esperados, principalmente porque o modelo teórico é adiabático — sem transferência de calor —, ao passo que, nos experimentos, existe a transferência de calor através das paredes do tanque. Além disso, as diferentes perdas de carga nos componentes do aparato experimental não são previstas pelo modelo teórico. Isolar termicamente o tanque e reduzir as perdas de carga aproximam mais os valores experimentais dos teóricos, sendo que esse poderia ser o objetivo da otimização de um sistema da carga e descarga de um tanque de gás comprimido.

Conclusão

O estudo apresentado permitiu integrar, de forma coerente e acessível economicamente, a fundamentação teórica clássica dos processos transitórios

de carga e descarga de tanques de gases comprimidos com a verificação experimental de sua dinâmica termodinâmica. As deduções analíticas baseadas nas leis de conservação da massa e da energia, sob as hipóteses de gás ideal e processos adiabáticos, mostraram-se adequadas para descrever o comportamento global do sistema, estabelecendo relações diretas entre pressão e temperatura durante os regimes de carregamento e esvaziamento do tanque.

A comparação entre os resultados experimentais obtidos e os modelos ideais evidenciou o caráter didático do aparato experimental proposto neste capítulo. As diferenças quantitativas observadas, da ordem de 20% em relação aos valores teóricos, podem ser atribuídas às perdas térmicas para o ambiente e às limitações associadas às medições de temperatura e pressão. Tais desvios, longe de comprometer a validade dos experimentos, reforçam o entendimento sobre as simplificações inerentes aos modelos teóricos e ilustram o impacto das condições reais de operação em processos termodinâmicos não estacionários.

O aparato experimental, de concepção simples e baixo custo, mostrou-se eficaz como ferramenta pedagógica, permitindo aos estudantes observar de forma direta fenômenos transitórios de compressão e expansão de gases — normalmente abordados apenas de maneira teórica nos cursos de Engenharia Mecânica. A possibilidade de controlar e registrar parâmetros em tempo real, por meio de um controlador baseado em uma placa Arduino ou similar, amplia as oportunidades de experimentação, tornando o estudo mais interativo e alinhado às práticas contemporâneas de ensino de engenharia.

Do ponto de vista científico e tecnológico, os resultados demonstram a aplicabilidade dos conceitos discutidos em contextos atuais, como o armazenamento e o reabastecimento de hidrogênio em tanques pressurizados, em que a gestão térmica e o controle dos processos transitórios são determinantes para a segurança e a eficiência operacionais.

Conclui-se, portanto, que o trabalho atinge plenamente seu objetivo de articular teoria e prática no estudo dos processos transitórios em sistemas pressurizados, contribuindo tanto para a formação acadêmica de Engenheiros Mecânicos quanto para o aprimoramento da compreensão dos fenômenos termodinâmicos envolvidos em aplicações energéticas modernas.

Em continuação ao presente trabalho, sugere-se i) ampliar o estudo para condições não adiabáticas, ii) a inclusão de medições de vazão em tempo real e iii) o uso de outros gases, para consolidar a aplicabilidade do modelo.

Referências

- Borgnakke, C., & Sonntag, R. E. (2018). *Fundamentos da termodinâmica* (8a ed.). Série Van Wylen. São Paulo: Blucher.
- Caponi, R., Ferrario, A. M., Del Zotto, L., & Bocci, E. (2023). Hydrogen refueling stations and fuel cell buses four-year operational analysis under real-world conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, pp. 20957-20970.
- Denton, J. D., & Gostelow, J. P. (2016). *Sir John Harold Horlock FREng. 19 April 1928 — 22 May 2015. Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, v. 62, pp. 213-232.
- Dutton, J. C., & Coverdill, R. E. (1997). Experiments to study the gaseous discharge and filling of vessels. *Journal of Engineering*, v. 13, n. 2, pp. 125-134.
- Horlock, J. H., & Woods, D. (1965). **The thermodynamics of charging and discharging processes.** *In*: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IME), v. 184, pp. 47-56.
- SAE International. (2020). **SAE J2601_202005: fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles.** Warrendale, EUA: SAE International.
- Sdanghi, G., Maranzana, G., Celzard, A., & Fierro, V. (2019). Review of the current technologies and performances of hydrogen compression for stationary and automotive applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 102, pp. 150-170.
- Xu, B., Lu, S., Jia, W., Du, H., Fan, M., & Wang, R. (2021). Thermodynamic study on charge-discharge processes and cycle of cascaded latent heat storage in heating system. *Energy and Buildings*, v. 249, n. 1, p. 111216.

9- Futuros engenheiros mecânicos conduzem estudo e produção de prótese transtibial como parte da extensão universitária

Rafael Welerson Sott Meyer³⁰

Yipsy Roque Benito³¹

Apresentação

O presente capítulo apresenta uma análise realizada pelo Grupo de Educação Tutorial da Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora (GETMEC). Como parte de uma ação de extensão, os membros do GETMEC tiveram a oportunidade de pôr em prática vários conhecimentos adquiridos de maneira teórica durante o curso e, ao mesmo tempo, dialogar com problemas apremiantes para a comunidade do entorno da universidade. A partir do caso de uma jovem que chegou ao nosso grupo em busca de ajuda com sua prótese transtibial, o GETMEC propôs um projeto bastante desafiador visando a construção de uma prótese apropriada para testes, em prol de diminuir o custo de aquisição desse dispositivo que é vital para seus usuários. Apresentam-se aqui algumas das etapas percorridas no desenvolvimento do projeto. Apesar de que o mesmo ainda se encontra em desenvolvimento, já demonstrou a importância da extensão universitária na conscientização sobre as problemáticas da sociedade e no comprometimento da instituição e todo seu capital humano na busca conjunta por soluções.

³⁰ Graduando em Engenharia Mecânica, UFJF, E-mail: rafael.meyer@estudante.ufjf.br. Orcid: 0009-0008-6669-3096

³¹ Professora do Departamento de Engenharia Mecânica da UFJF E-mail: yipsy.benito@ufjf.br Orcid: 0000-0002-1524-6172

1. Introdução

Uma prótese transtibial é um dispositivo de grande importância para pessoas que passaram por amputações abaixo do joelho. A prótese permite a essas pessoas restaurarem a funcionalidade e manter um estilo de vida ativo. Desenvolvidas para oferecer conforto e suporte, essas próteses são moldadas de acordo com a anatomia e biomecânica da perna. Com avanços constantes em tecnologia e materiais, elas se tornam cada vez mais sofisticadas, facilitando a adaptação dos usuários. Contudo, ao observarmos a realidade de uma cidade como Juiz de Fora, constatamos que o acesso a esses avanços tecnológicos é extremamente limitado, sobretudo, para pessoas de baixa renda. O preço de uma prótese transtibial pode variar entre R\$5000 e R\$100000 ou mais e tem uma vida útil que, dependendo do uso e dos materiais, pode estar entre três e cinco anos (BIONICENTER, 2025).

O presente trabalho propõe-se avançar na pesquisa nesse campo, buscando contribuir com a funcionalidade, o conforto e a qualidade de vida para os usuários de próteses transtibiais. Para tal, foi considerado o caso de estudo de uma jovem que procurou o Departamento de Engenharia Mecânica, para expor sua necessidade de barateamento da sua prótese. Ela forneceu uma prótese já em desuso para servir como referência para as modificações que serão propostas. O Grupo de Educação Tutorial da Engenharia Mecânica (GETMEC) propôs, então, um projeto bastante desafiador que visa a construção de uma prótese apropriada para testes e auxílio da aluna.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta as primeiras etapas desse projeto e tem os seguintes objetivos:

1. Definir um fluxograma para o desenvolvimento de um protótipo
2. Elaborar matrizes morfológicas de todos os componentes para auxiliar na escolha de alternativas de próteses, segundo as demandas da usuária
3. Definir o Modelo matemático
4. Simular nova prótese a partir das dimensões e materiais propostos preliminarmente
5. Determinar a espessura mínima para a parede do encaixe, de maneira que atenda aos critérios de resistência mecânica, fadiga e estabilidade estrutural.

O projeto não se limita à adequação do equipamento, mas também tem como objetivo promover a inclusão, acessibilidade e independência da

estudante em seu ambiente de estudo e convivência. Assim, o desenvolvimento dessa prótese personalizada representa um passo importante na valorização da diversidade funcional, aliando conhecimento técnico à empatia e à responsabilidade social.

2. Fundamentos

A construção de uma prótese transtibial envolve a aplicação de tecnologia e engenharia para desenvolver dispositivos que substituem a perna abaixo do joelho. Os principais componentes incluem uma estrutura que se encaixa confortavelmente na perna do usuário, uma articulação para permitir movimentos naturais, e um pé que proporciona estabilidade e mobilidade. Materiais leves e duráveis, como fibra de carbono, frequentemente são utilizados para garantir eficiência e conforto. Além disso, avanços recentes na área incluem o uso de sensores e sistemas eletrônicos para melhorar a resposta da prótese aos movimentos do usuário, proporcionando uma experiência mais próxima possível da função natural da perna.

A personalização da prótese de acordo com as necessidades individuais do usuário também é uma área de pesquisa ativa, visando otimizar o desempenho e a adaptação.

2.1 Principais componentes da prótese transtibial

De acordo com a revisão da bibliografia realizada, a prótese transtibial é dividida em três componentes principais: **encaixe, corpo e pé**.

- O **encaixe** é a parte superior da prótese, responsável por envolver o coto e fazer contato direto com a pele do usuário. Ele é considerado uma das partes mais críticas do sistema protético, pois garante o conforto, estabilidade e o correto posicionamento da prótese. Um encaixe mal ajustado pode causar dor, lesões na pele e dificultar a locomoção (CARVALHO et al., 2018).
- O **corpo**, ou estrutura intermediária, é a seção entre o encaixe e o pé protético. Essa parte representa funcionalmente a porção da perna que foi amputada — como a canela e a panturrilha — e tem como função principal manter o alinhamento, transmitir a carga e permitir a movimentação adequada durante a marcha (SILVA, 2020).
- O **pé protético** constitui a base de apoio do sistema. É projetado para absorver impactos, garantir equilíbrio e simular a ação do pé natural

durante o caminhar. A escolha do tipo de pé (simples, articulado, com retorno de energia, entre outros) varia de acordo com o perfil e as necessidades do usuário (GONÇALVES & MENEZES, 2017).

Esses três componentes, representados na Figura 1, devem trabalhar em conjunto para proporcionar ao usuário o máximo de funcionalidade, segurança e conforto, sendo o **encaixe** a parte mais personalizada e, muitas vezes, a mais onerosa em termos de manutenção e substituição, como é o caso da usuária descrita no estudo de caso.

Figura 1: Partes de uma prótese transtibial

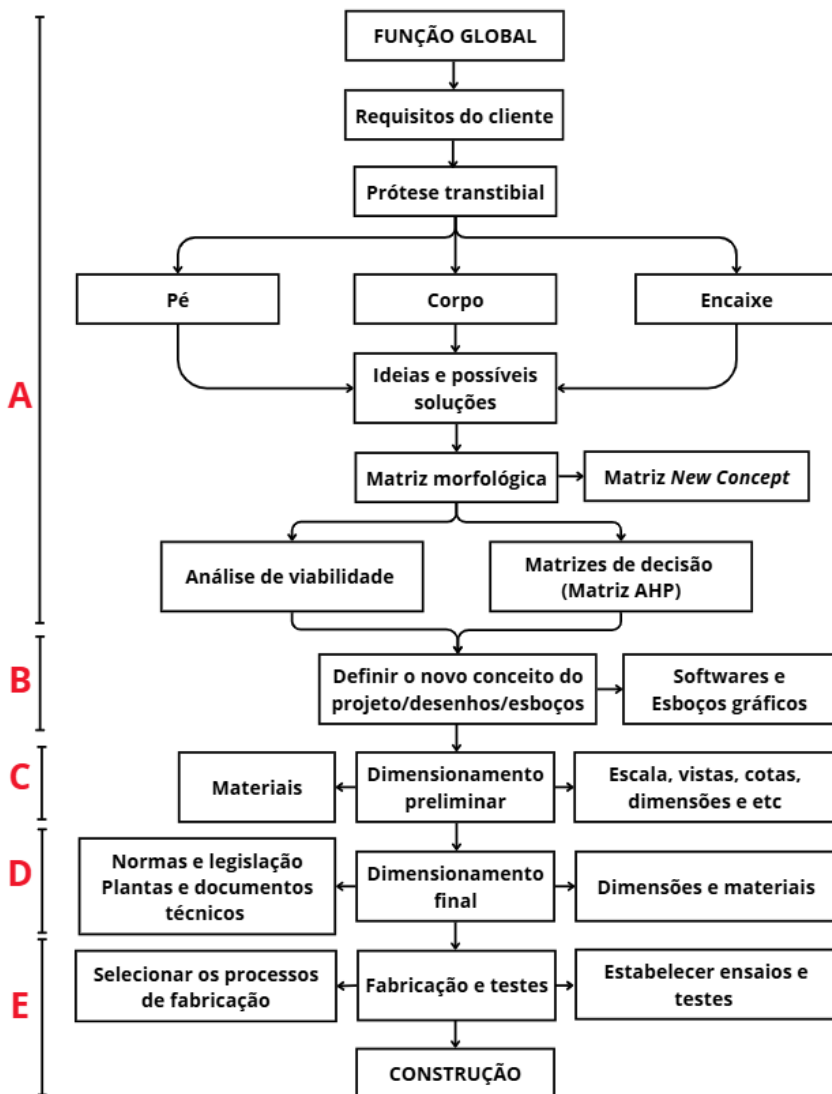


Fonte: dos autores

2.2 Etapas do desenvolvimento

Para um projeto de prótese transtibial foram identificadas as etapas de Projeto Preliminar, Projeto Conceitual, Projeto Detalhado e Fabricação e Testes, em que serão referenciados de forma mais detalhada posteriormente no artigo. Na figura 2, é apresentado o fluxograma identificando os passos a serem seguidos para desenvolver a proposta, desde os requisitos do cliente até chegar na construção.

Figura 2: Fluxograma de tarefas prévias à construção da prótese



Fonte: Dos autores

Como representado no fluxograma da Figura 2, podem ser identificadas cinco etapas principais denominadas pelas letras da A à E. Cada uma delas será detalhada a seguir.

- A) Definição do problema: primeiramente, é necessário estabelecer os principais requisitos do cliente, ou seja, aquilo que ele espera e as

principais características para atingir o objetivo. Segundo Grando (2018), "as necessidades dos clientes são fundamentais para o desenvolvimento de novos produtos, pois permitem definir prioridades e garantir que os atributos valorizados pelo consumidor sejam atendidos". A partir disso, faz-se uma análise do mercado atual para os diferentes componentes do produto em questão, visto que é a forma mais fácil de compreender a tecnologia de funcionamento e os preços de mercado dos mesmos. Uma ferramenta muito utilizada com esse objetivo é a matriz morfológica, já que é imprescindível saber em qual lugar no mercado o produto se encontraria, baseando-se numa análise de requisitos/peso e numa Matriz *New Concept* (MNC). Após essa etapa, a equipe irá sugerir diversas ideias para a mesma finalidade, visando encontrar uma ampla gama de soluções para atingir o que foi pré-estabelecido na MNC. Em seguida, é necessário filtrar quais ideias prosseguirão, através de análises de viabilidade e, caso seja necessário, a utilização de matrizes de decisão, por exemplo a matriz AHP.

- B) Projeto conceitual: nesta etapa, a principal ideia escolhida deverá ser esboçada, através de desenhos técnicos, croquis e outros métodos, para que seja escolhida a forma do produto, visando observar e analisar os pontos iniciais e a linha de design que será seguida pela equipe, não sendo bloqueado por essa etapa. Lembrando que é importante a elaboração de mais de um esboço, visto que não apenas uma ideia é a correta.
- C) Projeto preliminar: nesse momento, é realizado o dimensionamento preliminar, no qual são escolhidas escalas, vistas, cotas e dimensões, sem necessariamente ser realizado um dimensionamento minucioso, mas sim uma ideia inicial do tamanho do protótipo. Ademais, os materiais também são vislumbrados nessa etapa, lembrando que apenas ao realizar o dimensionamento final, ou seja, através de cálculos, é possível dizer se irá falhar ou não.
- D) Projeto detalhado: agora, no projeto detalhado é feito o dimensionamento final, em que são vislumbrados todas dimensões e materiais que serão utilizados. É importante ressaltar o uso de normas e legislações que parametrizam os cálculos e escolhas que serão feitas, já que assim o produto poderá ter legalidade de uso para outros meios, como no cotidiano, e não só para o estudo acadêmico. Além disso,

nessa etapa são feitos os documentos técnicos (memorial de cálculo) e as plantas do projeto.

- E) Fabricação e testes: por fim, serão selecionados os processos de fabricação para cada peça do protótipo e estabelecidos os ensaios e testes necessários para validar o produto criado.

3. Estudo de caso

3.1 Precedentes

O GETMEC foi procurado por uma jovem estudante que apresenta uma condição congênita conhecida como mielomeningocele. Esta condição consiste em uma má formação do tubo neural que afeta o desenvolvimento da medula espinhal, podendo ocasionar limitações motoras e sensoriais significativas.

Em virtude de complicações decorrentes dessa condição, a usuária precisou passar por um processo de amputação transtibial (abaixo do joelho) da perna esquerda. A decisão pela amputação foi tomada após a ocorrência de múltiplas infecções, dificuldades de locomoção e dor crônica que compromete gravemente sua qualidade de vida e sua autonomia.

Atualmente, a estudante utiliza uma prótese transtibial para auxiliar em sua mobilidade. No entanto, o alto custo da manutenção e das trocas periódicas do encaixe — peça fundamental para o conforto, estabilidade e eficiência da prótese — representa um grande desafio. Devido ao uso contínuo, o encaixe da prótese tende a se afrouxar com o tempo, exigindo ajustes ou substituições, o que não é viável financeiramente para a usuária.

Além disso, a estudante enfrenta barreiras no cotidiano universitário, como deslocamentos frequentes dentro do campus, necessidade de permanecer longos períodos em pé ou sentada em salas de aula, além da ausência de adaptações em determinados espaços físicos. Tudo isso intensifica sua necessidade por uma solução que seja ao mesmo tempo acessível, funcional, confortável e durável.

A seguir, e de acordo com as etapas definidas na Figura 2, será apresentado o avanço do nosso estudo. No momento atual, nos encontramos desenvolvendo a etapa “D”, projeto detalhado, a qual aparece aqui parcialmente.

3.2 Etapas do desenvolvimento do estudo de caso

A) Definição do problema

De acordo com os principais requisitos da cliente, o GETMEC se comprometeu a desenvolver um modelo alternativo de prótese transtibial, com foco em:

- Redução de custos, tornando o dispositivo mais acessível;
- Facilidade de ajuste do encaixe, considerando possíveis variações de volume no coto ao longo do tempo;
- Durabilidade e resistência, para suportar o uso constante no ambiente universitário;
- Conforto e ergonomia, respeitando as limitações e características individuais da usuária;
- Autonomia de uso, visando reduzir a dependência de serviços especializados para ajustes frequentes.

A partir desta definição, faz-se uma análise do mercado para os diferentes componentes da prótese. A pesquisa de mercado elaborada foi realizada pelo GETMEC (2023).

A partir desta pesquisa foi aplicado o modelo de matriz morfológica, conhecida como *Matriz New Concept* (MNC). Basicamente, a MNC leva em conta uma nota de 1 a 10, onde 1 é o pior possível e 10 é o melhor possível, sendo avaliado por atributos escolhidos pelo cliente, como custo, disponibilidade, estética/acabamento, durabilidade e peso. Os pesos de cada atributo (1% a 100%) são dados em relação à importância de cada uma das características.

À maneira de exemplo, na Tabela 1 é mostrada a MNC para o componente “encaixe”.

Tabela 1: Matriz morfológica MNC para o encaixe

Requisitos \ Materiais	Fibra de vidro	Fibra de carbono	Poliamida
Custo (40%)	8	3	6
Durabilidade (30%)	7	9	8
Peso (15%)	5	8	5
Disponibilidade (10%)	7	4	5
Estética/ acabamento (5%)	6	8	7
SCORE	7,05	5,9	6,4

Fonte: Do autor

Após definir a MNC para cada um dos componentes, a equipe sugere diversas ideias para a mesma finalidade, visando encontrar uma ampla gama de soluções para atingir o que foi pré-estabelecido na MNC. Em seguida, é necessário filtrar quais ideias prosseguirão, através de análises de viabilidade e, caso seja necessário, a utilização de matrizes de decisão.

B) Projeto conceitual

Para realizar essa etapa foi feito um modelo 3D no *software* SolidWorks®, para que fosse possível visualizar o produto que seria criado pelo GETMEC e, além disso, obter um modelo comparativo do mesmo. Na figura 3, tem-se a imagem do produto modelado.

Figura 3: Modelo 3D da prótese transtibial



Fonte: autores

Com esse modelo pronto é possível seguir para a próxima etapa, o dimensionamento da prótese modelada, para sabermos os materiais, espessura e outros fatores importantes para garantir a segurança da peça.

C) Projeto preliminar

Para uma ideia inicial do tamanho do protótipo, se faz uma primeira seleção dos materiais baseada nas MNC de cada componente, os quais são mostrados na tabela 2.

Tabela 2: Materiais de cada peça

Peça	Encaixe	Corpo	Pé
Materiais	Fibra de vidro	Aço	Madeira

Fonte : Do autor

Para realizar o dimensionamento inicial foi requerida a altura e peso da usuária visando a criação de um manequim no *software* Catia V5R21®, para que o encaixe pudesse ser simulado em ambiente 3D.

D) Projeto detalhado

Como parte desta etapa, devem definir-se todas as dimensões do protótipo, de acordo com os materiais presentes na Tabela 2. É importante ressaltar o uso de normas e legislações que parametrizam os cálculos e escolhas

que serão feitas, já que assim o produto poderá ter legalidade de uso para outros meios, como no cotidiano, e não só para o estudo acadêmico.

No caso de uma prótese transtibial o encaixe é único para cada pessoa, visto que ele tem que se adequar de forma ideal ao coto do usuário, então não é possível ter um dimensionamento certo. O melhor a se fazer nesse caso é realizar a confecção do molde diretamente no coto. O pé será comprado comercialmente, visto que a fabricação dele é extremamente menos vantajosa em relação ao custo-benefício. O corpo será reaproveitado da prótese antiga, para evitar gastos relacionados a material e tempo de trabalho.

4. Determinação da espessura ótima do encaixe

Próteses transtibiais são dispositivos médicos críticos, projetados para suportar cargas significativas durante atividades como caminhar, correr ou subir escadas. A falha desses dispositivos pode resultar em lesões graves ou incapacidade permanente, tornando essencial o desenvolvimento de métodos robustos para sua análise e projeto. Portanto, a espessura do encaixe da prótese é uma dimensão crítica para garantir a confiabilidade do protótipo.

A metodologia proposta combina modelagem matemática, simulação computacional e otimização numérica, oferecendo uma abordagem sistemática para o projeto de próteses seguras e eficientes. Para garantir a funcionalidade e segurança da prótese transtibial, foi desenvolvido um código computacional em Python para otimizar a espessura da parede do cilindro protético. O objetivo é determinar a espessura mínima que atenda aos critérios de resistência mecânica, fadiga e estabilidade estrutural (flambagem). A metodologia e equações utilizadas são descritas nos próximos tópicos.

4.1 Modelagem matemática

Este estudo foca na determinação da espessura mínima do encaixe da prótese, estabelecendo três critérios principais: (i) Resistência à carga estática e dinâmica; (ii) limitação por fadiga do material e (iii) estabilidade contra a flambagem.

As seguintes hipóteses simplificadoras foram adotadas:

- A geometria do encaixe foi aproximada a um cilindro
- O material é homogêneo, isotrópico e segue um comportamento elástico linear.
- A forma geométrica do encaixe será considerada como um cilindro oco

- O cilindro é considerado de parede fina ($t < 0,1D$).
- As condições de contorno são extremidades articuladas para o cálculo de flambagem.

A seguir, serão apresentadas as equações usadas para os cálculos.

4.1.1 Fator de segurança e carga dinâmica

Força do projeto (F_{design}) é a força que o componente ou estrutura deve suportar de maneira segura durante sua vida útil, considerando tanto as cargas aplicadas quanto os fatores de segurança. Essa força é determinada com base nas condições operacionais e nos critérios de resistência do material, garantindo que o sistema funcione sem falhas estruturais.

O fator de segurança (FS) é um coeficiente aplicado no projeto para assegurar que a estrutura ou componente não atinja sua falha prematuramente. Ele é definido como a razão entre a resistência do material e a tensão máxima esperada no projeto:

$$FS = \frac{\text{Tensão limite}}{\text{Tensão real aplicada}} \quad (1)$$

Valores típicos de fator de segurança variam de acordo com a aplicação e o nível de incerteza envolvido. Para materiais sujeitos a cargas estáticas, FS pode variar entre 1,5 e 3, enquanto para cargas dinâmicas e imprevisíveis, como em componentes sujeitos a fadiga, FS pode ultrapassar 5 (NORTON, 2013).

A carga dinâmica refere-se às forças que variam com o tempo, podendo incluir impactos, vibrações e oscilações repetitivas. Esses tipos de carga podem acelerar falhas por fadiga e flambagem, tornando essencial a consideração de fatores de segurança adequados. Segundo Budynas e Nisbett (2015), a combinação de FS e Cd é amplamente utilizada em projetos biomecânicos, visto que "o projeto mecânico deve considerar os efeitos das cargas dinâmicas, pois estas frequentemente reduzem a vida útil dos componentes estruturais devido à fadiga e à propagação de trincas".

$$F_{design} = F_{aplicada} \cdot \text{Fator de segurança} \cdot \text{Carga dinâmica} \quad (2)$$

O fator de segurança (FS = 16) é elevado devido à criticidade de aplicações médicas, onde falhas podem ter consequências graves (ASME,

2021). O fator dinâmico ($C_d = 1,2$) considera aumentos repentinos de carga, como ao pisar em um buraco ou descer escadas (NORTON, 2013).

4.1.2 Tensão admissível

A tensão admissível, ($\sigma_{admissível}$), é definida como a máxima tensão que um material pode suportar de forma segura, sem risco de falha ou deformação permanente. Ela é determinada a partir da tensão de escoamento ou de ruptura do material, aplicando-se um fator de segurança para garantir a integridade estrutural da peça. Esse conceito é amplamente utilizado na engenharia mecânica e estrutural para projetar componentes que suportem cargas sem comprometer sua funcionalidade.

Segundo Hibbeler (2010), "a tensão admissível é obtida ao dividir a tensão limite do material por um fator de segurança, garantindo que o componente opere dentro de uma margem segura de resistência". A tensão admissível é calculada com base em dois critérios principais: a resistência à falha estática e a resistência à fadiga do material. A tensão admissível é definida como o menor valor entre esses dois critérios, garantindo que o material não falhe nem sob cargas estáticas extremas nem por fadiga após ciclos repetidos de carga. A equação utilizada é:

$$\sigma_{admissível} = \min\left(\frac{\sigma_{ruptura}}{\text{Fator de segurança}}, \sigma_{fadiga}\right) \quad (3)$$

4.1.3 Tensão aplicada ou de ruptura

A tensão aplicada ($\sigma_{aplicada}$) deve ser comparada com a tensão admissível para garantir que o material não falhe, além disso diminui à medida que a espessura da parede aumenta. Isso ocorre, porque a área da seção transversal ($A = \pi Dt$) cresce proporcionalmente com t , distribuindo a carga em uma área maior.

A área da seção transversal é $A = \pi Dt$, válida para cilindros de parede fina ($t < 0,1D$) (Hibbeler, 2016) e quanto maior a espessura (t), menor a tensão aplicada, pois a carga é distribuída em uma área maior. A tensão na parede do cilindro é calculada pela relação entre a força de projeto e a área da seção transversal:

$$\sigma_{aplicada} = \frac{F_{design}}{\pi \cdot D \cdot t'} \quad (4)$$

Equação derivada da teoria de tensão normal em cilindros (Timoshenko, 1956).

4.1.4 Análise de flambagem

A verificação de flambagem se dá a partir da comparação entre a tensão crítica de flambagem e a tensão admissível do material. A flambagem ocorre quando um elemento estrutural esbelto submetido à compressão axial sofre uma instabilidade repentina, desviando-se lateralmente sem necessariamente atingir a tensão de escoamento. Esse fenômeno é descrito pela equação de Euler, onde a fórmula de Euler é válida para colunas esbeltas (Timoshenko & Gere, 2009), que expressa a tensão crítica como:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(\lambda_{ef})^2} \quad (5)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material e λ_{ef} é o raio de giração efetivo, dependente das condições de apoio da estrutura.

Segundo Beer et al. (2017), "a flambagem pode ser evitada se a tensão crítica for mantida acima da tensão real aplicada, garantindo que a estrutura opere dentro de uma margem segura de resistência".

A carga crítica de flambagem (P_{cr}) é calculada pela fórmula de Euler para colunas curtas:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} \quad (6)$$

Onde:

- E → módulo de elasticidade (20 GPa);
- I → momento de inércia da seção transversal ($I = \frac{\pi}{4} \cdot (r_{externo}^4 - r_{interno}^4)$);
- $K \cdot L$ → comprimento efetivo (assumido como 2r, onde $r = D/2$).

A espessura determinada será válida se $P_{cr} > F_{design}$.

4.2 Simulação computacional

Para otimizar a espessura, é utilizado um código computacional, em PYTHON que utiliza a função *minimize_scalar* da biblioteca SciPy para encontrar a espessura mínima ($t_{ótima}$) que satisfaça:

$$\begin{aligned} \sigma_{aplicada} &\leq \sigma_{admissível} \\ P_{cr} &> F_{design} \end{aligned}$$

A função objetivo *minimiza t* é restrita às condições acima. O intervalo de busca foi definido entre 0,1 mm e 10 mm.

A Tabela 3 resume os parâmetros de entrada utilizados na simulação modelo, baseados em normas técnicas e propriedades de materiais biocompatíveis, como o policarbonato de alta resistência.

Tabela 3: Parâmetros de entrada

Parâmetro	Valor	Unidade	Descrição
Força aplicada (F)	800	N	Carga máxima durante a marcha.
Fator de segurança (FS)	16	–	Margem de segurança para aplicações médicas.
Fator dinâmico (Cd)	1,2	–	Acréscimo para impactos e variações de carga.
Diâmetro do cilindro (D)	0,15	m	Diâmetro externo do cilindro (15 cm).
Tensão de ruptura ($\sigma_{ruptura}$)	150	MPa	Resistência máxima do material.
Módulo de elasticidade (E)	20	GPa	Rigidez do material.
Tensão de fadiga (σ_{fadiga})	75	MPa	Resistência a cargas repetidas (50% da ruptura).

Fonte: Do autor

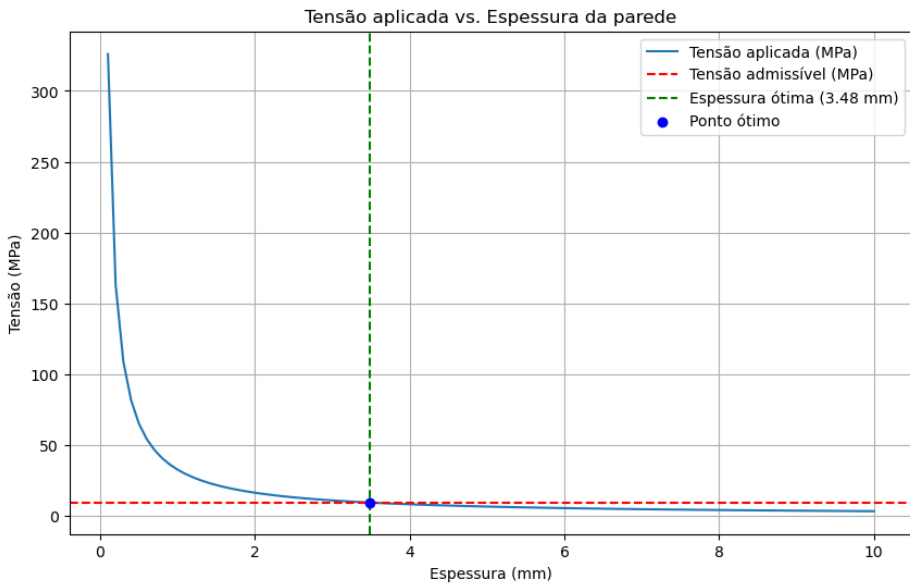
4.3 Resultados da simulação

Os melhores resultados obtidos seguindo os parâmetros de entrada e as variações obtidas por código são:

- Espessura ótima: 3,48 mm
- Tensão aplicada: 14,72 MPa (inferior à tensão admissível de 15 MPa)
- Carga crítica de flambagem: 10,2 kN (superior à força de projeto de 9,6 kN)

O gráfico da Figura 4 mostra a relação inversa entre espessura e tensão. A linha vermelha indica o limite admissível.

Figura 4: Tensão aplicada vs. Espessura

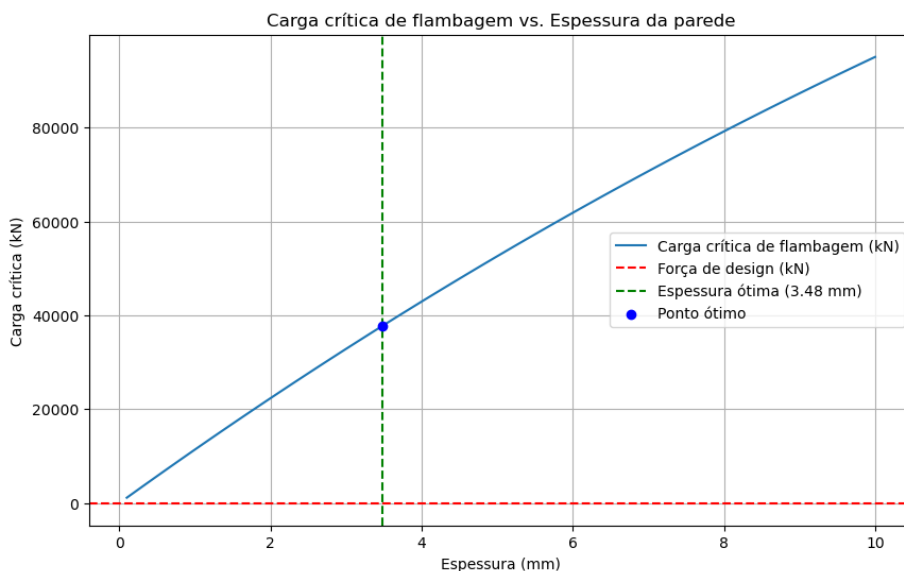


Fonte: Autores

Na Figura 4, a linha vermelha indica o limite admissível. O ponto ótimo, determinado pela intersecção das curvas de Tensão aplicada e Tensão admissível, garante segurança estrutural para uma espessura de parede do encaixe de 3,48 mm.

A Figura 5 mostra a dependência entre a carga crítica e a espessura.

Figura 5: Carga crítica de flambagem vs. Espessura



É constatado que a carga crítica aumenta exponencialmente com a espessura, confirmando que a espessura ótima evita colapso por flambagem.

5. Conclusões

Como parte de um projeto de extensão, mais abrangente, que visa desenvolver alternativas para uma prótese transtibial, no presente trabalho foi apresentada uma parte das etapas de desenvolvimento.

A partir da definição de um fluxograma para o desenvolvimento de um protótipo de prótese que guiou o trabalho

Foram elaboradas matrizes morfológicas de todos os componentes, o que apoiou a escolha de alternativas de próteses que melhorem a funcionalidade, o conforto e a qualidade, considerando custo, durabilidade, estética, peso e disponibilidade, segundo as demandas da usuária para, futuramente, propor alterações que poderiam ser feitas na prótese atual.

Foi elaborado o modelo matemático, relacionando os parâmetros fundamentais que garantem, simultaneamente, os critérios de resistência à carga estática e dinâmica; limitação por fadiga do material e estabilidade contra a flambagem.

A partir da simulação da nova prótese, considerando os materiais propostos, foi determinada a espessura mínima para a parede do encaixe, obtendo o valor de 3,48 mm para os parâmetros considerados.

O trabalho trouxe, ademais, o contato de alunos de graduação em Engenharia Mecânica com problemas reais que afetam a população do entorno da universidade. Através da extensão universitária, foi possível o avanço do grupo na conscientização sobre problemáticas atuais da sociedade. Os membros do GETMEC tiveram a oportunidade de pôr em prática conhecimentos teóricos aprendidos no curso e de aprender um pouco sobre a forma de lidar com a realidade e seus desafios.

Referências bibliográficas

NORTON, Robert L. Projeto de máquinas [recurso eletrônico]: uma abordagem integrada. Tradução: Konstantinos Dimitriou Stavropoulos et al. 4. ed. Dados eletrônicos. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. Projeto de engenharia mecânica. Tradução: João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar. - 7. ed. - Porto Alegre: Bookman, 2005

JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kart M. Fundamentos do projeto de componentes de máquinas I. Tradução e revisão técnica: Fernando Ribeiro da Silva. [Reimpr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

TILLEY, Alvin R. The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design. New York: [s.n], 1993.

BIONICENTER, Quanto Custa uma Prótese de Perna (Transtibial)? Quais Fatores Influenciam o Valor? Disponível em: <https://bionicenter.com.br/2024/11/22/quanto-custa-uma-protese-de-perna-transtibial-quais-fatores-influenciam-o-valor/> acesso em 14 mar. 2025.

GRANDO, Nei. **A identificação das necessidades do cliente no desenvolvimento de novos produtos.** 2018. Disponível em: <https://neigrando.com/2018/12/02/a-identificacao-das-necessidades-do-cliente-no-desenvolvimento-de-novos-produtos/>. Acesso em: 19 mar. 2025.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos materiais*. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. Disponível em: Resistência dos Materiais - R C Hibbeler (7ª edição) : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive. Acesso em: 19 mar. 2025

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON Jr., E. Russell; DeWOLF, John T.; MAZUREK, David F. *Mecânica dos Materiais*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2015. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Mec%C3%A2nica_dos_Materiais_7%C2%AA_Edi%C3%A7%C3%A3o.html?id=6aHrBgAAQBAJ. Acesso em: 19 mar. 2025

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Projeto de elementos de máquinas de Shigley**. 10. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2015. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Shigley>. Acesso em: 19 mar. 2025.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2013. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Norton>. Acesso em: 19 mar. 2025.

CARVALHO, A. F. de et al. **Próteses transtibiais: adaptação, componentes e desafios clínicos**. *Revista Brasileira de Reabilitação*, v. 24, n. 2, p. 45–52, 2018.

SILVA, M. J. da. **Tecnologia e acessibilidade: uma análise funcional das próteses de membros inferiores**. *Revista de Engenharia Biomédica*, v. 36, n. 1, p. 30–39, 2020.

GONÇALVES, L. M.; MENEZES, R. P. **Estudo sobre próteses transtibiais e suas aplicações funcionais**. *Caderno Técnico de Engenharia Mecânica*, v. 10, n. 3, p. 89–97, 2017.

TIMOSHENKO, S.; Gere, J. (2009). *Theory of Elastic Stability*. Dover.

GETMEC Análise do mercado atual de Próteses Transtibiais, 2023. [link](https://drive.google.com/file/d/1dyD8dIfp5n-U-VguOA9C-kMHayyYAL9D/view?usp=sharing). Disponível em <https://drive.google.com/file/d/1dyD8dIfp5n-U-VguOA9C-kMHayyYAL9D/view?usp=sharing> acesso em 2025.

10- Rejeitos da Samarco e espécies forrageiras: uma revisão crítica sobre a caracterização físico-química e a mitigação ambiental

Paola Ramos Coutinho Reis³²

Lilian Lúcia Rocha e Silva³³

Jairo Tronto³⁴

Leônidas Paixão Passos³⁵

Júlio César José da Silva³⁶

1 Introdução

A bacia hidrográfica do rio Doce abrange uma extensão de 879 km e atravessa os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Dentro dessa bacia, existem vários complexos de mineração, incluindo o complexo de Germano, operado pela Samarco Mineração (IGAM, 2016). No dia 5 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem do Fundão, resultando no vazamento de cerca de 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração no vale do Rio Doce, representando um dos maiores desastres de mineração do mundo. A barragem de Fundão está localizada no Rio Gualaxo do Norte, como

³² Doutora em Química. Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de Química. E-mail: paolarcoutinho@yahoo.com.br. Orcid 0000-0002-3909-9576.

³³ Doutora em Química. Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de Química. E-mail: lilian.silva@ufjf.br. Orcid 0000-0003-3331-2118.

³⁴ Doutor em Química. Universidade Federal de Viçosa. Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas. E-mail: jairotronto@ufv.br. Orcid 0000-0001-8658-8383.

³⁵ Doutor em Agronomy and Plant Genetic. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Leite. E-mail: leonidas.passos@embrapa.br. Orcid 0000-0001-9795-0755

³⁶ Doutor em Química. Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de Química. E-mail: julio.silva@ufjf.br. Orcid 0000-0002-8708-1557

parte do complexo minerário de Germano, no distrito de Bento Rodrigues, município de Mariana –MG; distrito este que sofreu também grandes impactos pelo desastre (Araújo, 2022; Omachi, 2018).

A área mais afetada corresponde aos primeiros 80 km da bacia, ao longo das margens do Rio Gualaxo do Norte, onde houve alterações parciais ou totais nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. A extensão, o grau e as consequências desse impacto ainda não são totalmente conhecidos, o que tem levado a estudos focados nos efeitos deletérios causados sobre o meio ambiente, bem como na proposição de estratégias para remediação/amenização dos mesmos (Ribeiro Junior, Zago, 2019; Zanotelli, 2024).

2 Processamento do minério de ferro

Minas Gerais destaca-se na mineração por ser o maior produtor de minério de ferro do Brasil, concentrando grandes reservas no Quadrilátero Ferrífero, o que incentiva investimentos em pesquisas para aumentar a eficiência e sustentabilidade das operações (Nascimento, 2010). A Samarco iniciou em 1977 o beneficiamento do Itabirito na Mina de Germano, pioneiro no Brasil, tratando rochas metamórficas compostas principalmente por quartzo e óxidos de ferro, com teor médio de ferro de 49% (Reatto, 1998).

O minério de ferro é essencial para a economia nacional e a siderurgia, ocupando posição de destaque na produção mundial (Vieira, 2008). A composição mineralógica do Itabirito inclui hematita (Fe_2O_3), goethita (FeOOH), magnetita (Fe_3O_4) e quartzo (SiO_2), cada um com características físicas e químicas específicas (Martins, 2022). O minério é transportado para britagem e peneiramento, seguido de flotação, processo que separa hematita e quartzo usando amido e surfatantes catiônicos (Pires, 2003; Martins, 2012), coletando a hematita para uso industrial e descartando o quartzo e outros minerais de ganga (Duarte, 2020). Os rejeitos resultantes da separação são armazenados em reservatórios ou barragens, conforme a legislação ambiental, para minimizar impactos ao meio ambiente (Zinato, 2016).

3 Rejeito de mineração

Os rejeitos de mineração são subprodutos do processamento mineral, compostos por areia, grãos finos, água e outros elementos químicos, alguns potencialmente poluentes (Wang, 2017). Esses resíduos podem causar diversos impactos ambientais, como contaminação do solo e da água, destruição de habitats, poluição do ar e alterações nos ecossistemas (Silva, 2022; Ferreira, 2022; Zago, 2019; Sá, 2023; Coelho, 2020; Anda, 2022).

No caso dos rejeitos de ferro da Samarco, eles contêm óxido de ferro,

quartzo e baixas concentrações de outros metais (BRASIL, 2016; EMBRAPA, 2014), podendo afetar a cadeia alimentar e a saúde humana (IBAMA, 2015; GRUPO DA FORÇA-TAREFA, 2016; Penna, 2022). Esses rejeitos alteram as propriedades físicas e químicas do solo, formando crostas ferruginosas impermeáveis, elevando o pH e reduzindo a fertilidade devido à baixa disponibilidade de macro e micronutrientes essenciais para o desenvolvimento vegetal (Batista, 2015; Zago, 2019). Além disso, a contaminação pode aumentar a concentração de elementos tóxicos em plantas e alimentos, representando riscos à saúde e exigindo avaliações de longo prazo para mensurar os impactos ecológicos (Borges, 2016).

4 Reutilização do rejeito

A mineração é fundamental para o desenvolvimento econômico do Brasil, mas a disposição de resíduos, como estéril e rejeitos, gera impactos ambientais significativos, especialmente à medida que reservas de alto teor se esgotam, aumentando a produção de rejeitos (Araújo, 2022). Estima-se que a cada tonelada de minério de ferro beneficiado, cerca de 0,4 toneladas de rejeito sejam geradas. A recuperação e o aproveitamento desses resíduos têm relevância ambiental e econômica, podendo ser reutilizados em diversas aplicações, reduzindo o descarte e promovendo sustentabilidade (Silva, 2017).

Entre os usos estudados, destacam-se a cerâmica vermelha (42%), concreto (25%), argamassas (17%), filtros de barragens (8%) e aplicações agrícolas (8%), com ênfase na construção civil (89% dos estudos) e na agricultura (11%). Tais iniciativas contribuem para a preservação ambiental e impulsionam o avanço tecnológico e econômico, equilibrando progresso e sustentabilidade (Araújo, 2012; Barreto, 2001; Silva, 2017).

5 Espécies forrageiras (braquiárias)

O gênero *Urochloa* inclui diversas espécies de braquiárias amplamente cultivadas no Brasil devido à facilidade de semeadura, rápido crescimento, baixa exigência nutricional e adaptação a solos ácidos e de baixa fertilidade (Junior, 2019; Silva, 2022). Essas gramíneas são fundamentais para a pecuária brasileira, ocupando cerca de 85% das pastagens (Macedo, 2013), e são utilizadas tanto como alimento para gado quanto como cobertura do solo em sistemas de plantio direto (Silva, 2013; Barbero, 2021).

Em áreas afetadas por rejeitos de mineração, o capim-braquiária é recomendado para recuperação de solos degradados devido à sua alta produção de biomassa, rápido crescimento e tolerância a elementos químicos tóxicos (Gomes, 2011; Stumpf, 2014). Estudos mostram que braquiárias podem

acumular elementos como Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, N, Na, Ni e Zn, tanto em raízes quanto em partes aéreas, variando conforme a espécie e as condições de cultivo, além de absorver nutrientes essenciais para seu desenvolvimento (Silva, 2022; Marques, 2015; Lakshmi, 2013; Vaz, 2012).

5.1 Nutrientes

5.1.1 Macronutrientes

Os macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) são absorvidos em maiores quantidades pelas plantas (Ronquim, 2010). O N é fundamental para a formação de proteínas, fotossíntese, metabolismo e produção de hormônios, sendo sua deficiência responsável por clorose, crescimento lento e baixa biomassa, tornando a adubação nitrogenada necessária (Costa, 2006). O P é vital para transferência e armazenamento de energia, divisão celular, desenvolvimento radicular e formação de sementes, com deficiência causando crescimento reduzido e folhas arroxeadas; sua disponibilidade é influenciada pelo pH e interação com Al e Fe (Novais, 2007; Sousa, 2012). O K regula o crescimento radicular, abertura estomática e equilíbrio celular, melhorando resistência a estresses e qualidade da forragem, enquanto sua deficiência diminui a produtividade (Ragel, 2019; Moraes, 2019; Longo, 2011).

O Ca fortalece paredes celulares e regula transporte de nutrientes, com carência levando a deformações foliares e baixa biomassa (Souza, 2009; Prado, 2008). O Mg, componente da clorofila, é essencial para fotossíntese, metabolismo proteico e transporte de P; sua deficiência reduz a fotossíntese e causa clorose (Guo, 2016; Hauer-Jákli e Tränkner, 2019). O S participa da síntese de aminoácidos, vitaminas e enzimas, além de auxiliar na formação de clorofila e resistência a doenças; sua deficiência provoca clorose em folhas jovens e redução da produtividade, sendo a matéria orgânica a principal fonte disponível (Malavolta, 2006; Alvarez, 2014).

5.1.2 Micronutrientes

Os micronutrientes, boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e Zinco (Zn) são absorvidos em menores quantidades (Ronquim, 2010). O Cu atua na fotossíntese, respiração e metabolismo do N, e sua deficiência causa clorose e menor crescimento (Borkert, 1994; Santini, 2015). O Fe participa da síntese de clorofila e da respiração celular; sua deficiência leva à clorose internerval e baixa produtividade, especialmente em solos alcalinos (Ourives, 2010; Epstein, 2006). O Mn é essencial na fotossíntese e proteção contra estresse oxidativo;

sua deficiência causa clorose e manchas necróticas (Silva, 2013; Andresen, 2018; Epstein, 2006).

O Ni tem papel limitado, mas influencia o crescimento vegetal e depende de fatores do solo (Chhabra, 2022). O Zn ativa enzimas, regula o crescimento e confere resistência a estresses; sua carência reduz a biomassa e provoca clorose (Braz, 2004; Abranches, 2009; Borkert, 1994; Costa, 2015).

5.1.3 Elementos benéficos e tóxicos

Elementos como alumínio (Al), cobalto (Co), silício (Si), selênio (Se), níquel (Ni), sódio (Na) e vanádio – são considerados elementos benéficos porque, embora não sejam essenciais para todas as espécies vegetais, podem estimular o crescimento ou desempenhar funções específicas em determinadas plantas, ou sob condições ambientais particulares (Ronquim, 2010), enquanto arsênio (As), cádmio (Cd), e chumbo (Pb) são tóxicos mesmo em baixas concentrações (Klaassen, 2001).

O Na, embora essencial a animais, não é necessário às plantas e em excesso causa toxicidade e degradação do solo (Kidd, 2009; Malavolta, 2006; Prezotti, 2013). O Al, comum em solos ácidos, é tóxico, mas as braquiárias, especialmente *Urochloa decumbens*, apresentam alta tolerância (Torres, 2005; Arroyave, 2013). Metais como Cd e Cr também são tóxicos e exigem manejo cuidadoso para evitar contaminação (Khatun, 2022; Sharma, 2023; Nascimento, 2014; Malavolta, 2006). O manejo nutricional adequado é essencial para evitar deficiências e toxicidades, garantindo o equilíbrio e produtividade das braquiárias (El Sebai, 2022; Vieira, 2019; Fonseca, 2020).

5.2 Braquiárias e a produção de leite

No Brasil, grande parte da produção de leite depende de pastagens localizadas em solos ácidos e de baixa fertilidade, o que limita sua produtividade. Para contornar esse problema, é possível utilizar espécies de forrageiras adaptadas ou investir em fertilização e manejo adequado (Macedo, 1995).

As espécies do gênero *Urochloa*, como as braquiárias, apresentam boa adaptação a solos ácidos, tolerância a altos teores de Al e baixos teores de P e Ca, sendo amplamente utilizadas em regiões tropicais, inclusive no Brasil, onde ocupam cerca de 70 milhões de hectares (Rao, 1996; Xavier, 2002). O uso dessas espécies permite aumentar a produtividade das pastagens em solos desfavoráveis, contribuindo para a sustentabilidade da produção de leite, desde que combinado com manejo adequado e uso responsável de fertilizantes.

5.3 Braquiárias e a remediação de solos contaminados

O gênero *Urochloa* se destaca por sua capacidade de acumular elementos tóxicos, tornando-se promissor para fitorremediação, especialmente por meio da fitoextração, uma técnica de baixo custo, ecologicamente sustentável e que aproveita a energia solar (Lakshmi, 2013; Rabêlo, 2016; Vaz, 2012; Estrela, 2018). No entanto, é necessário considerar o tempo de ação e os limites de tolerância das plantas aos poluentes (Ali, 2013; Coutinho, 2007; Leduc, 2005). Em áreas impactadas pela mineração, como Mariana, a recuperação do solo envolve recultivo técnico e biológico, sendo a escolha de espécies vegetais adequada crucial para remover minerais tóxicos e restaurar a cobertura vegetal (Zago, 2019; Lakić, 2020).

A Samarco, responsável pelo desastre, testa diversas espécies para remediação e recuperação da fertilidade do solo via fitorremediação (Stumpf, 2014). Mais de cinco anos após o rompimento da barragem de Fundão, as pastagens afetadas continuam dominadas pela braquiária, que apresenta rápido crescimento, alta produção de biomassa e potencial tanto para recuperação do solo quanto para alimentação animal, desde que os níveis de minerais tóxicos sejam monitorados (Silva, 2022; Anda, 2022).

6 Caracterização físico-química do rejeito e do solo

6.1 Técnicas de classificação morfológica, elemental e mineralógica

A caracterização físico-química de rejeitos e solos é essencial para compreender suas propriedades e comportamentos. Entre as técnicas utilizadas, destacam-se a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e a Difração de Raios-X (DRX), que, em conjunto, permitem analisar a morfologia, composição química e mineralogia dos materiais (Lima, 2020; Gomes, 2022; Martins, 2022).

A técnica MEV fornece imagens em alta ampliação, possibilitando identificar forma, tamanho e textura das partículas, além de minerais específicos, aspectos importantes para entender a porosidade, retenção de água e presença de minerais tóxicos ou de interesse econômico (Morales, 2007; Lima, 2020; Gondim, 2022). Já a EDS permite identificar e quantificar os elementos químicos presentes, auxiliando na avaliação da fertilidade do solo e na detecção de componentes valiosos ou nocivos (Gomes, 2022). A DRX, por sua vez, identifica os minerais por meio da análise das estruturas cristalinas, sendo útil para determinar a mineralogia das frações argilosas e a estabilidade dos rejeitos (Martins, 2022).

O uso integrado das técnicas MEV/EDS e DRX é fundamental para a gestão sustentável do solo e dos rejeitos de mineração, permitindo o entendimento da disponibilidade de nutrientes, toxicidade e estratégias de recuperação de recursos (Lima, 2020; Gomes, 2022; Martins, 2022).

6.3 Técnicas para a determinação de macro e microelementos

A determinação de elementos em amostras de solo, rejeito e vegetais requer o uso de técnicas analíticas sensíveis e precisas, como a espectrometria de absorção atômica com atomização em chama (F AAS), a espectrometria de absorção atômica com forno de grafite (GF AAS), a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES) e a espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Essas técnicas apresentam alta sensibilidade, precisão e exatidão, permitindo a identificação confiável dos elementos presentes nas amostras (Taylor, 2000; Ebdon, 1995; García, 1992; Takuwa, 1997).

As técnicas F AAS e GF AAS são amplamente utilizadas na análise de metais em matrizes complexas, como sedimentos, fertilizantes, rejeitos de mineração e material particulado. A técnica F AAS é indicada para a quantificação de elementos em maiores concentrações, oferecendo rapidez e precisão, enquanto a técnica GF AAS apresenta maior sensibilidade e é capaz de detectar metais-traço em níveis baixos, como Cd e Pb (Mimura, 2016; Lourdes, 2020a; Lourdes, 2020b; Mimura, 2020; Pantuzzo, 2009). A combinação dessas técnicas, muitas vezes associada a métodos de extração assistida por ultrassom ou digestão por micro-ondas, permite obter altas recuperações e resultados confiáveis, mesmo em amostras de composição complexa, sendo útil para monitoramento ambiental, avaliação de fertilizantes e análise de risco à saúde humana (Mimura, 2016; Lourdes, 2020a; Lourdes, 2020b; Mimura, 2020; Pantuzzo, 2009).

A espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES) é uma abordagem analítica que permite a análise simultânea de diversos elementos. A amostra é nebulizada e atomizada em um plasma de argônio ionizado, onde átomos e íons excitados emitem luz em comprimentos de onda específicos, que são detectados e quantificados (Olesik, 1991; Novaes, 2016). Em solos, a ICP OES permite determinar metais tóxicos e elementos essenciais, como Al, P, Si, Ca e K, auxiliando na avaliação da fertilidade e do potencial de contaminação (Soares, 2010). Nos rejeitos de mineração, é usada para identificar metais e elementos traço, fundamentais para o diagnóstico ambiental e o manejo adequado desses materiais (Spaziani, 2006). Em plantas, a técnica analisa nutrientes como Fe, Mn, Zn e Cu, além de

detectar elementos tóxicos como Pb, Cd e Hg, importantes para o monitoramento nutricional e ambiental (Silva, 2007).

O uso combinado das técnicas AAS (F AAS e GF AAS) e ICP OES é essencial para a caracterização química detalhada de solos, rejeitos e vegetais, fornecendo informações que contribuem para a compreensão da fertilidade, da nutrição das plantas, do potencial de contaminação e dos riscos ambientais associados à disposição de rejeitos de mineração (Puga, 2015).

6.3.1 Preparo de amostras

A decomposição total de amostras sólidas, tais como, sedimentos, rejeitos e solos é uma etapa crucial para disponibilizar os elementos presentes nas amostras, permitindo sua posterior análise por meio de técnicas como AAS ou ICP OES. Diversos métodos são utilizados para essa finalidade, muitos dos quais envolvem o uso de ácidos concentrados (Mimura, 2017; Takase, 2002).

Um método recomendado pela USEPA 1995 é o método 3052, que utiliza uma combinação de ácido nítrico (HNO_3) e ácido clorídrico (HCl) ou peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para decompor as amostras. Outra abordagem comum é o uso de um bloco digestor, que aquece as amostras com ácidos concentrados em tubos de ensaio para solubilizar as substâncias presentes. Esse processo é fundamental para extrair os componentes desejados das amostras e permitir sua análise posteriormente (Silva, 2014).

A digestão em bloco digestor é amplamente utilizada na preparação de amostras vegetais, esse método é especialmente eficiente para decompor amostras de plantas e liberar os elementos de interesse para análise em AAS e ICP OES. Utilizando ácido nítrico (HNO_3), o bloco digestor mantém os tubos de digestão em um ambiente controlado de temperatura durante o processo, o que torna essa abordagem eficiente e padronizada para a decomposição de amostras vegetais (Aguiar, 2013).

7 Considerações finais

O rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em 5 de novembro de 2015 no distrito de Bento Rodrigues, município de Mariana (MG), liberou entre 50 e 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro, configurando-se como o maior desastre ambiental da história do Brasil. As consequências atingiram dimensões ecológicas, sociais e econômicas expressivas, afetando solos, rios, comunidades e o oceano Atlântico. Desde então, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de compreender os impactos desse rejeito sobre os ecossistemas e avaliar estratégias de recuperação das áreas afetadas.

Freitas (2023) analisaram os efeitos ecofisiológicos dos rejeitos de mineração em *Mucuna pruriens* var. *utilis*, uma leguminosa nativa cultivada em diferentes proporções de rejeito e solo. O estudo demonstrou que o aumento da concentração de rejeitos reduziu o crescimento das plantas, não apenas pela baixa fertilidade do material, mas principalmente pelo excesso de manganês (Mn), que provocou desequilíbrio na relação Fe/Mn e reduziu a fotossíntese da planta. Os autores destacam a necessidade de considerar o Mn como um contaminante ambiental relevante, especialmente em contextos de revegetação.

De forma complementar, Zago (2019) investigaram o uso de gramíneas aromáticas — *Chrysopogon zizanioides* (vetiver), *Cymbopogon citratus* (capim-limão) e *Cymbopogon winterianus* (citronela) — no fitorremanejamento de áreas contaminadas em Bento Rodrigues. Os resultados mostraram que a adição de composto orgânico e a inoculação com fungos micorrizas aumentaram significativamente a biomassa das plantas e reduziram a absorção de Fe e Mn, indicando que o manejo biotecnológico do solo melhora a tolerância vegetal aos rejeitos e favorece a recuperação ambiental.

Do ponto de vista da toxicologia ambiental, Segura (2016) analisaram amostras de lama, solo e água seis dias após o rompimento da barragem. Os autores observaram concentrações elevadas de ferro e manganês — cerca de quatro vezes acima do limite máximo legal — e detectaram altos teores de prata (Ag) nas águas superficiais. Ensaio com células humanas (HepG2) e *Allium cepa* indicaram potencial citotóxico e genotóxico, além de baixa diversidade microbiana nos rejeitos, o que reforça a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade ambiental na região afetada.

Em relação aos impactos sobre ecossistemas aquáticos, Bottino (2017) avaliaram o crescimento das macrófitas *Egeria densa* e *Chara sp.* em condições simuladas de contaminação por rejeitos. Inicialmente, as plantas apresentaram aumento de biomassa e taxas de crescimento elevadas, mas, a longo prazo, a contaminação reduziu o desenvolvimento, indicando efeitos subletais cumulativos nos vegetais aquáticos e possíveis alterações na dinâmica ecológica dos ambientes atingidos.

De Oliveira Gomes (2017) investigaram os efeitos imediatos no estuário do rio Doce, observando aumento de até cinco vezes nas concentrações de metais traço e perda de organismos bentônicos de superfície, devido à rápida sedimentação da lama. Embora os efeitos de curto prazo não tenham sido diretamente correlacionados aos metais, os autores ressaltam a importância de estudos de longo prazo para compreender a recuperação da biodiversidade bentônica.

Em uma perspectiva agrícola, Andrade (2018) avaliaram o cultivo de arroz (*Oryza sativa*) em solos misturados com diferentes proporções de lama

residual. O estudo mostrou que, embora os grãos apresentassem baixos níveis de elementos tóxicos, como arsênio (As), cádmio (Cd) e chumbo (Pb), a presença excessiva de lama reduziu o crescimento das raízes e a produtividade. A deficiência nutricional e as características físicas do rejeito foram os principais fatores limitantes, mas a adição de matéria orgânica e solo fértil favoreceu o desenvolvimento vegetal, sugerindo um uso agrícola controlado do rejeito.

Por fim, de Almeida (2020) ampliou essa discussão ao avaliar o cultivo de espécies agrícolas diversas, como feijão, milho, braquiária, crotalária, rúcula e rabanete, diretamente no rejeito. Os resultados indicaram ausência de metais tóxicos perigosos e produtividade semelhante à do solo comum para a maioria das espécies, exceto a braquiária, que apresentou menor desempenho devido à compactação do substrato. O estudo aponta a viabilidade do cultivo agrícola em áreas afetadas, desde que haja correções de fertilidade e manejo adequado do solo.

Em conjunto, esses trabalhos demonstram que os rejeitos da barragem de Fundão, apesar de apresentarem risco ecotoxicológico e limitações físicas e nutricionais, podem ser reaproveitados de forma controlada em estratégias de fitorremediação e recuperação ambiental, além de potenciais usos agrícolas experimentais. Contudo, é essencial o acompanhamento contínuo da qualidade ambiental e a integração de abordagens físico-químicas, biológicas e socioeconômicas para garantir segurança ecológica e sustentabilidade regional.

Agradecimentos

Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal de Juiz de Fora (PPGQ-UFJF), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, processo RED-00056-23), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). P.R.C.R agradece à CAPES pela bolsa de doutorado concedida. J.T agradece ao CNPq pela bolsa de pesquisa de Nível 2 de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação e pela bolsa de Produtividade em desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora, Nível 2.

Referências

Abranches, J. L., Batista, G. S., dos Ramos, S. B., & Prado, R. D. M. (2009). Resposta da aveia preta à aplicação de zinco em Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 4(3), 278-282.

Aguiar, C. A., Munhos, K. G., Saidelles, A. P. F., Muller, C. C., de Moraes Flores, É. M., & Kirchner, R. M. (2013). Determinação de Manganês em Amostras Vegetais como Bioindicador da Qualidade do Meio Ambiente. **BBR-Biochemistry and Biotechnology Reports**, 2(3esp), 67-70.

Ali, H.; Khan, E.; & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals - Concepts and applications. **Chemosphere**, 91,869–881.

Anda, M., Purwantari, N. D., Yulistiani, D., Suryani, E., & Agus, F. (2022). Reclamation of post-tin mining areas using forages: A strategy based on soil mineralogy, chemical properties and particle size of the refused materials. **Catena**, 213, 106140.

Andrade, G. F., Paniz, F. P., Martins Jr, A. C., Rocha, B. A., da Silva Lobato, A. K., Rodrigues, J. L., ...& Batista, B. L. (2018). Agricultural use of Samarco's spilled mud assessed by rice cultivation: a promising residue use? *Chemosphere*, 193, 892-902.

Andresen, E., Peiter, E., & Küpper, H. (2018). Trace metal metabolism in plants. **Journal of experimental botany**, 69(5), 909-954.

Araújo, B. D., Maia, R., Arantes-Garcia, L., Oki, Y., Negreiros, D., De Assis, I. R., & Fernandes, G. W. (2022). Aftershocks of the samarco disaster: Diminished growth and increased metal content of raphanus sativus cultivated in soil with mining tailings. **Acta Scientiarum-Biological Sciences**, v. 44.

Araújo, M. M.S.; Santos, H. I.; Ferreira, O. M. (2012). **Análise do gerenciamento dos resíduos sólidos da mineração Serra Grande S.A., Município de Crixás - Goiás**. 1989. 180 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia.

Arroyave, C., Tolrà, R., Thuy, T., Barceló, J., & Poschenrieder, C. (2013). Differential aluminum resistance in *Brachiaria* species. **Environmental and Experimental Botany**, 89, 11-18.

Barbero, R. P., Ribeiro, A. C. C., Moura, A. M., Longhini, V. Z., Mattos, T. F. A., & Barbero M. M. D. (2021). Production potential of beef cattle in tropical pastures: a review. **Ciência Animal Brasileira**, 22, 1-21.

Barreto, M. L. (2001). **Mineração e desenvolvimento sustentável: Desafios para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.

Batista, K., Giacomini, A., Mattos, W., Gerdes, L., & Otsuk, I. (2015). Changes in the chemical properties of soil cultivated with *Brachiaria ruziziensis* regarding nitrogen fertilization. **International Journal of Plant & Soil Science**, 7(3), 160-171.

Borkert, C. M.; Yorinori, J. T.; Corrêa-Ferreira, B. S.; Almeida, A. M. R.; Ferreira, L. P.; & Sfredo, G. J. (1994). **Seja o doutor da sua soja**, 66.

Bottino, F., Milan, J. A. M., Cunha-Santino, M. B., & Bianchini Jr, I. (2017). Influence of the residue from an iron mining dam in the growth of two macrophyte species. **Chemosphere**, 186, 488-494.

Brasil, Câmara Dos Deputados. (2016). **Comissão Externa do Rompimento de Barragem na Região de Mariana – MG (CEXBARRA) RELATÓRIO FINAL.**

Braz, A. J. B. P., Da Silveira, P. M., Kliemann, H. J., & Zimmermann, F. J. P. (2004). Acumulação de nutrientes em folhas de milho e dos capins braquiária e mombaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 34, n. 2, p. 83-87.

Burges, A., Epelde, L., Benito, G., Artetxe, U., Becerril, J. M., & Garbisu, C. (2016). Enhancement of ecosystem services during endophyte-assisted aided phytostabilization of metal contaminated mine soil. **Science of the Total Environment**, v. 562, p. 480-492.

Chhabra, R. (2022). Salt-affected Soils and Marginal Waters: Global Perspectives and Sustainable Management. **Springer Nature**, p. 101-160.

Coelho, D. G., Marinato, C. S., De Matos, L. P., De Andrade, H. M., Da Silva, V. M., Neves, P. H. S., & De Oliveira, J. A. (2020). Evaluation of metals in soil and tissues of economic-interest plants grown in sites affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 596-607.

Costa, H.T.D. (2015). **Concentração de metais pesados nos solos utilizados para agricultura urbana na cidade de Lisboa.** 2015. Dissertação de Mestrado (Engenharia do Ambiente), Universidade de Lisboa (Portugal).

Costa, K.A. P.; De Oliveira, I. P.; & Faquin, V. (2006). Adubação nitrogenada para pastagens do gênero Brachiaria em solos do Cerrado. **Documentos / Embrapa Arroz e Feijão**, ISSN 1678-9644, 192, Santo Antônio de Goiás :Embrapa Arroz e Feijão.

Coutinho, H. D.; & Barbosas, A. R. (2007). Fitorremediação: Considerações gerais e características de utilização. **Silva Lusitana**, 15(1), 103-117.

de Almeida, H. A. (2020). **Potencial de uso do rejeito de minério de ferro oriundo do rompimento da barragem de Fundão (Mariana, MG) para o cultivo de espécies agrícolas.**

de Oliveira Gomes, L. E., Correa, L. B., Sá, F., Neto, R. R., & Bernardino, A. F. (2017). The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, 120(1-2), 28-36.

Duarte, H. A. (2020). Ferro-Um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. **Química Nova**, v. 42, p. 1146-1153.

Ebdon, L., Foulkes, M., & O'Hanlon, K. (1995). Optimised simultaneous multi-element analysis of environmental slurry samples by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry using a segmented array charge-coupled device detector. **Analytica Chimica Acta**, 311(2), 123-134.

El Sebai, T., & Abdallah, M. (2022). Role of microorganisms in alleviating the abiotic stress conditions affecting plant growth. In **Advances in plant defense mechanisms. IntechOpen.**

Embrapa. (2014). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ª edição revista.

Epstein, E., & Bloom, A. (2006). **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. Editora Planta, Londrina, PR, Brazil.

Estrela, M. A., Chaves, L. H. G., & Silva, L. N. (2018). Fitorremediação como solução para solos contaminados por metais pesados. **Revista Ceuma Perspectivas**, 31(1), 160-172.

Ferreira, D. A., Gaião, L. M., Kozovits, A. R., & Messias, M. C. (2021). Evaluation of metal accumulation in the forage grass *Brachiaria decumbens* Stapf grown in contaminated soils with iron tailings. **Integrated Environmental Assessment and Management**, 18(2), 528-538.

Fonseca, A. A., Santos, D. A., Passos, R. R., Andrade, F. V., & Rangel, O. J. P. (2020). Phosphorus availability and grass growth in biochar-modified acid soil: a study excluding the effects of soil pH. **Soil Use and Management**, 36(4), 714-725.

Freitas, J. C. E., De Resende, C. F., de Paula Pimenta, M., Frattini, L. M., Reis, P. R. C., Miranda, J. B., ... & Peixoto, P. H. P. (2023). Assessing the ecophysiological effects of iron mining tailings on velvet bean: implications for growth limitations based on mineral composition and physicochemical properties of tailings-soil substrates. **Brazilian Journal of Botany**, 46(3), 715-729.

García, I. L., Viñas, P., & Córdoba, M. H. (1992). Slurry procedure for the determination of titanium in plant materials using electrothermal atomic absorption spectrometry. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, 7(3), 529-532.

Gomes, A. C. F., Cordeiro, C. C. M., Santos, R. A. D., Soares, V. R. A., & Rocha, S. D. F. (2022). Aplicação de rejeito de mineração em pequena escala de ouro na produção de tijolo de solo-cimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, 27, e13141.

Gomes, M. P., Nogueira, M. D. O. G., Castro, E. M. D., & Soares, Â. M. (2011). Ecophysiological and anatomical changes due to uptake and accumulation of heavy metal in *Brachiaria decumbens*. **Scientia Agricola**, 68, 566-573.

Gondim, T. F., Ingunza, M. D. P. D., Freitas Neto, O. D., & Santos Júnior, O. F. D. (2022). Potencialidade de uso do resíduo da scheelita em sistemas de cobertura de aterro de resíduos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 27, 597-606.

GRUPO DA FORÇA-TAREFA, Governo Do Estado De Minas. (2016). **Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana-MG**.

Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., & Yang, D. (2016). Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. **The Crop Journal**, 4(2), 83-91.

Hauer-Jákli, M., & Tränkner, M. (2019). Critical leaf magnesium thresholds and the impact of magnesium on plant growth and photo-oxidative defense: a systematic review and meta-analysis from 70 years of research. **Frontiers in Plant Science**, 10, 766.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, (2015). **Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. Laudo Técnico Preliminar.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas Gerência de Monitoramento de Qualidade das Águas. (2016). **Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Doce Após o Rompimento da Barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG**.

Junior, A. B. O., Figueiredo, M. A. P., Fogaça, C. A., Figueiredo, L. H. A., & Horn, A. H. (2019). Análise foliar de *Urochloa Decumbens* e identificação de plantas invasoras em uma área de recuperação de um depósito de metalurgia de zinco. **Geochimica Brasiliensis**, 33(4), 370-377.

Klaassen, C. D. (2001). **Toxicology: The Basic Science of Poisons**. 6 ed. McGraw-Hill, p.812-837.

Khatun, J., Intekhab, A., & Dhak, D. (2022). Effect of uncontrolled fertilization and heavy metal toxicity associated with arsenic (As), lead (Pb) and cadmium (Cd), and possible remediation. **Toxicology**, 477, 153274.

Kidd, P., Barceló, J., Bernal, M. P., Navari-Izzo, F., Poschenrieder, C., Shilev, S., ... & Monterroso, C. (2009). Trace element behaviour at the root–soil interface: implications in phytoremediation. **Environmental and Experimental Botany**, 67(1), 243-259.

Lakić, Ž., Predić, T., Đurđić, I., & Popović, V. (2020). Recultivation of degraded soil due to mining activity without adding organic layers of soil using Alfalfa and mixtures of grass legumes. **Agriculture & Forestry**, 66(4), 223-237.

Lakshmi, P. M., Jaison, S., Muthukumar, T., & Muthukumar, M. (2013). Assessment of metal accumulation capacity of *Brachiaria ramosa* collected from cement waste dumping area for the remediation of metal contaminated soil. **Ecological engineering**, 60, 96-98.

LeDuc, D. L., & Terry, N. (2005). Phytoremediation of toxic trace elements in soil and water. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, 32(11-12), 514-520.

Lima, T. O. C., & Oliveira, R. M. P. B. (2020). Reações expansivas em concretos com agregados minerais: uma revisão. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia-ISSN: 1984-5693**, 12.

Longo, R. M., Ribeiro, A. Í., & Melo, W. J. D. (2011). Uso da adubação verde na recuperação de solos degradados por mineração na floresta amazônica. **Bragantia**, 70, 139-146.

Lourdes, A. M., Cuin, A., Delbem, I. D., Campos, N. S., Sousa, R. A., Ciminelli, V. S., & Silva, J. C. (2020). Chemical Characterization and Human Health Risk Assessment Analysis of Cd, Cr, Fe, Mn and Zn. **Brazilian Journal of Analytical Chemistry**, 7(26), 36-50.

Lourdes, A. M., Mimura, A. M., Sousa, R. A., & Silva, J. C. (2020). Ultrasound-assisted Extraction of Cr, K, Na, Pb, and Zn in NPK Fertilizers and Determination by FAAS and FAES. **Atomic spectroscopy**, 37(3), 120-124.

Macedo, M. C. M., Zimmer, A. H., Kichel, A. N., Almeida, R. D., & Araujo, A. D. (2013). Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação. **Encontro de Adubação de Pastagens da Scot Consultoria. Ribeirão Preto: Scot Consultoria**, 1, 158-181.

Macedo, M. C. M. (1995). Pastagens no ecossistema cerrados: pesquisa para o desenvolvimento sustentável. In **Simpósio sobre pastagens nos ecossistemas brasileiros: pesquisa para o desenvolvimento sustentável** (pp. 28-62). Anais. Sociedade Brasileira de Zootecnia.

Malavolta, E. (2006). **Manual de nutrição mineral de plantas**. Agronômica Ceres.

Marques, R., Oliveira, M. A. D., Reis, C. R. D., Köpp, M. M., & Passos, L. P. (2015). A factorial design applied to the study of chromium toxicity on the glutathione levels of *Brachiaria brizantha* and *Brachiaria ruziziensis* seedlings. **Química Nova**, 38(7), 987-991.

Martins, M. A. A., de Jesus Junior, N. P., Taguchi, S. P., Oliveira, R. N., de Góes Casqueira, R., & Júnior, L. A. B. (2022). Utilização do resíduo de vidro de uma empresa metalúrgica para aplicação em placas de solo-cimento. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, 19, 0-0.

Martins, M., Lima, N. P., & Leal Filho, L. D. S. (2012). Depressão de minerais de ferro: influência da mineralogia, morfologia e pH de condicionamento. Rem: **Revista Escola de Minas**, 65, 393-400.

Mimura, A. M., Ferreira, C. C., & Silva, J. C. (2020). Evaluation of atmospheric particulate matter from an industrial area in Southeast Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, 192(12), 765.

Mimura, A. M. S., Ferreira, C. C. M., & Silva, J. C. J. (2017). Fast and feasible sample preparation methods for extraction of trace elements from deposited particulate matter samples. **Analytical Methods**, 9(3), 490-499.

Mimura, A. M., Oliveira, M. A., Ciminelli, V. S., & Silva, J. C. (2016). Optimization of ultrasound-assisted extraction of Cr, Cu, Zn, Cd, and Pb from sediment, followed by FAAS and GFAAS analysis. **Journal of AOAC International**, 99(1), 252-259.

Moraes, C. P., Brito, I. P. F. S., Matos, A. K. A., Carbonari, C. A., Gomes, G. L. G. C., & Velini, E. D. (2019). Efeito de subdoses de glyphosate no crescimento e no teor nutricional de plantas de capim-braquiária. **Anais Simpoherbi**, 1.

Morales, L. F. G., Hinrichs, R., & Fernandes, L. A. D. Á. (2007). A técnica de difração de elétrons retro-espalhados (EBSD) em microscópio eletrônico de varredura (MEV) e sua aplicação no estudo de rochas deformadas. **Pesquisas em Geociências**. Vol. 34, n. 1 (jan./jun. 2007), p. 19-34.

Nascimento, D. R. (2010). **Flotação aniônica de minério de ferro**. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Nascimento, S. S., Silva, E. D. B., Alleoni, L. R. F., Graziotti, P. H., Fonseca, F. G., & Nardis, B. O. (2014). Availability and accumulation of lead for forage grasses in contaminated soil. **Journal of soil science and plant nutrition**, 14(4), 783-802.

Novaes, C. G., Bezerra, M. A., da Silva, E. G. P., dos Santos, A. M. P., da Silva Romão, I. L., & Neto, J. H. S. (2016). A review of multivariate designs applied to the optimization of methods based on inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP OES). **Microchemical journal**, 128, 331-346.

Olesik, J. W. (1991). Elemental analysis using icp-oes and icp/ms. **Analytical Chemistry**, 63(1), 12A-21A.

Omachi, C. Y., Siani, S. M., Chagas, F. M., Mascagni, M. L., Cordeiro, M., Garcia, G. D., ... & Thompson, F. L. (2018). Atlantic Forest loss caused by the world's largest tailing dam collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil). **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, 12, 30-34.

Ourives, O. E. A., Souza, G. M., Tiritan, C. S., & Santos, D. H. (2010). Fertilizante orgânico como fonte de fósforo no cultivo inicial de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 2, p. 126-132.

Pantuzzo, F. L., Silva, J. C. J., & Ciminelli, V. S. (2009). A fast and accurate microwave-assisted digestion method for arsenic determination in complex mining residues by flame atomic absorption spectrometry. **Journal of hazardous materials**, 168(2-3), 1636-1638.

Penna, I. C., Martins, T. S., & da Silveira, J. V. W. (2022). Fibras Eletrofiadas Aplicadas na Remoção de Metais Pesados em Águas Residuárias da Mineração: uma Revisão Sistemática. **Revista Virtual de Química**, 14(3).

Pires, J. M. M., Lena, J. C. D., Machado, C. C., & Pereira, R. S. (2003). Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: estudo de caso da barragem de Germano. **Revista Árvore**, 27, 393-397.

Prado, R. D. M. (2008). Manual de nutrição de plantas forrageiras. **Jaboticabal: Funep**, 1, 261-280.

Prezotti, L. C., & Guarçoni, A. M. (2013). **Guia de interpretações de análise de solo e foliar**.

Puga, A. P. (2015). Biocarvão na mitigação da toxicidade de metais pesados em solos de área de mineração. **Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas**, 105.

Rabêlo, F. H. S., & Borgo, L. (2016). Changes caused by heavy metals in micronutrient content and antioxidant system of forage grasses used for phytoremediation: an overview. **Ciência Rural**, 46, 1368-1375.

Ragel, P., Raddatz, N., Leidi, E. O., Quintero, F. J., & Pardo, J. M. (2019). Regulation of K⁺ nutrition in plants. **Frontiers in Plant Science**, 10, 281.

Rao, I. M.; & Cramer, G. R. (1996). Plant Nutrition and Crop. **Plants, Genes, and Crop Biotechnology**, p. 270.

Reatto, A., Fontes, M. P. F., Alvarez V, V. H., Resende, M., Ker, J. C., & Costa, L. M. (1998). Caracterização mineralógica, potencial de reserva e sustentabilidade agrícola de alguns sítios florestais de eucalipto da região do Vale do Rio Doce (MG). **Revista brasileira de ciência do solo**, 22, 255-266.

Ribeiro, A. C., Silva, A. O., Batista, É. R., Naves, F. S., Pinto, F. A., Santos, J. V. D., ... & Carneiro, M. A. C. (2021). Biochemical attributes and establishment of tree seedlings in soil after *Urochloa decumbens* cultivation in soil with deposition of iron mining residues. **Cerne**, 27, e-102623.

Ronquim, C. C. (2010). **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**.

de Sá, R. T. S., Prianti, M. T. A., Andrade, R., Silva, A. O., Batista, É. R., Dos Santos, J. V., ... & Ribeiro, B. T. (2023). Detailed characterization of iron-rich tailings after the Fundão dam failure, Brazil, with inclusion of proximal sensors data, as a secure basis for environmental and agricultural restoration. **Environmental Research**, 228, 115858.

Santini, J. M. K., Buzetti, S., Galino, F. S., Dupas, E., & Coaguila, D. N. (2015). Técnicas de manejo para recuperação de pastagens degradadas de capim-braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf cv. Basilisk). **Boletim de Indústria Animal**, v. 72, n. 4, p. 331-340.

Segura, F. R., Nunes, E. A., Paniz, F. P., Paulelli, A. C. C., Rodrigues, G. B., Braga, G. Ú. L., ... & Batista, B. L. (2016). Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, 218, 813-825.

Sharma, J. K., Kumar, N., Singh, N. P., & Santal, A. R. (2023). Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. **Frontiers in Plant Science**, 14, 1076876.

Silva, D. R., Schaefer, C. E. G. R., Kuki, K. N., Santos, M. F. S., Heringer, G., & da Silva, L. C. (2022). Why is *Brachiaria decumbens* Stapf. a common species in the mining tailings of the Fundão dam in Minas Gerais, Brazil? **Environmental Science and Pollution Research**, 29(52), 79168-79183.

Silva, J. C. J., Matos, J. M., Divino, A. C., Ferreira, T. P., & Ciminelli, V. S. T. (2014). Determinação de metais pesados em amostras de sedimentos superficiais da bacia do rio São Francisco por espectrometria de massas com fonte de plasma acoplada indutivamente após decomposição ácida assistida por radiação micro-ondas. **Eclética Química**, 39, 22-34.

Silva, J. G., Gomes, M. P., Pereira, E. G., Bicalho, E. M., & Garcia, Q. S. (2022). Initial growth of *Peltophorum dubium* is affected by nitrogen source and manganese concentration. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 22(1), 201-211.

Silva, L. C. S., Marinho, D. Y., Silva Filho, C. M. D., Silva, E. C. S., & Espinosa, J. W. M. (2017). Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração. **Anais do IX SIMPROD**.

Silva, M. L. D. S., Vitti, G. C., & Trevizam, A. R. (2007). Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 42, 527-535.

Silva, P. I., Martins, A. M., Gouvea, E. G., Pessoa-Filho, M., & Ferreira, M. E. (2013). Development and validation of microsatellite markers for *Brachiaria ruziziensis* obtained by partial genome assembly of Illumina single-end reads. **Bmc Genomics**, 14(1), 17.

Silva, T. R., de Mello Prado, R., Davalo, M. J., da Silva, M. S., Montes, R. M., & Borges, B. M. M. N. (2013). Manganês no crescimento e na produção de massa seca de capim-braquiária cultivado em Latossolo Vermelho distrófico. **Científica**, 41(1), 94-98.

Silva, Y. J. A. B. D., Nascimento, C. W. A. D., Biondi, C. M., & Preston, W. (2014). Comparação de métodos de digestão para metais pesados em fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38, 650-655.

Soares, R., Escaleira, V., Monteiro, M. I. C., Pontes, F. V. M., Santelli, R. E., & Bernardi, A. C. D. C. (2010). Uso de ICP OES e titrimetria para a determinação de cálcio, magnésio e alumínio em amostras de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34, 1553-1559.

Souza, E. A. D., Moraes, J. C. D., Amaral, J. L. D., Liberato, R. D., Bonelli, E. A., & Lima, L. R. (2009). Efeito da aplicação de silicato de cálcio em *Brachiaria rizantha* cv. Marandu sobre a população de ninfas do percevejo castanho das raízes *Scaptocoris carvalhoi* Becker, 1967, características químicas do solo, planta e produção de matéria seca. **Ciência e Agrotecnologia**, 33, 1518-1526.

Spaziani, M., De Oliveira, P. V., Cadore, S., De Oliveira, E., & Prestes, A. P. L. (2006). Determinação de alguns constituintes inorgânicos em amostras de vinhos por espectrometria atômica: ICP OES e ETAAS. **CEP**, v. 5508, p. 900.

Stumpf, L., Pauletto, E. A., Costa de-Castro, R., Spinelli-Pinto, L. F., Fontana-Fernandes, F., Stumpf da-Silva, T., ... & Nunes, M. R. (2014). Capability of grass in recovery of a degraded area after coal mining. **Agrociencia**, 48(5), 477-487.

Takase, I., Pereira, H. B., Luna, A. S., Grinberg, P., & Campos, R. C. D. (2002). A geração química de vapor em espectrometria atômica. **Química Nova**, 25, 1132-1144.

Takuwa, D. T., Sawula, G., Wibetoe, G., & Lund, W. (1997). Determination of cobalt, nickel and copper in flowers, leaves, stem and roots of plants using ultrasonic slurry

sampling electrothermal atomic absorption spectrometry. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, 12(8), 849-854.

Taylor, A., Branch, S., Halls, D. J., Owen, L. M., & White, M. (2000). Clinical and biological materials, foods and beverages. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, 15(4), 451-487.

Torres, A. M., & Morton, C. M. (2005). Molecular and morphological phylogenetic analysis of *Brachiaria* and *Urochloa* (Poaceae). **Molecular Phylogenetics and Evolution**, 37, 36-44.

USEPA - United State Environment Protection Agency. SW-846. (1995). Test Methods for Evaluating Solid Waste, **Physical Chemical Methods**.

Vaz, F. A. S., da Silva, P. A., Passos, L. P., Heller, M., Micke, G. A., Costa, A. C. O., & de Oliveira, M. A. L. (2012). Optimisation of a capillary zone electrophoresis methodology for simultaneous analysis of organic aliphatic acids in extracts of *Brachiaria brizantha*. **Phytochemical Analysis**, 23(6), 569-575.

Vieira, E. A., Galvão, F. C. A., & Barros, A. L. (2019). Influence of water limitation on the competitive interaction between two Cerrado species and the invasive grass *Brachiaria brizantha* cv. Piatã. **Plant Physiology and Biochemistry**, 135, 206-214.

Vieira, M. G. (2008). **Produção de um pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da SAMARCO**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2008.

Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., & Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. **Chemosphere**, 184, 594-600.

Xavier, D. F., Carvalho, M. M., BOTREL, M. D. A., & Vilela, D. (2002). **Características e potencialidades de pastagens de braquiárias para produção de leite**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2002. 31 P. 21 cm.

Zago, V. C. P., das Dores, N. C., & Watts, B. A. (2019). Strategy for phytomanagement in an area affected by iron ore dam rupture: A study case in Minas Gerais State, Brazil. **Environmental Pollution**, 249, 1029-1037.

Zanotelli, C. L. (2024). Efeitos permanentes da poluição oriunda da ruptura da barragem da empresa Samarco em Mariana (Minas Gerais) sobre a planície costeira do Rio Doce, Espírito Santo. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, (62).

Zinato, N. L. (2016). **Comparação entre as características estruturais e mineralógicas de rejeito de minério de ferro em faixas ultrafinas provenientes de diferentes depósitos e rotas de beneficiamento**. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

11- Produto Educacional sobre o desenvolvimento de vídeo educacional como recurso de prática formativa para professores

Daniele Dias Pereira³⁷

Marco Aurélio Kistemann Jr.³⁸

Resumo

O desenvolvimento de vídeos educacionais como ferramenta de prática formativa para professores é um tema relevante no contexto educacional atual, especialmente em relação à avaliação escolar. A avaliação não deve ser apenas uma medição de desempenho, mas um elemento transformador que contribua para a melhoria das práticas pedagógicas. Portanto, é crucial que as instituições de ensino repensem suas abordagens para não apenas melhorar os índices de escolarização, mas também promover a formação integral dos alunos. Neste cenário, o Coordenador Pedagógico desempenha um papel essencial ao facilitar a reflexão e a reestruturação das práticas educativas. O Objeto de Aprendizagem (OA) "Avaliação" surge como uma inovação, buscando substituir modelos avaliativos tradicionais e excludentes por um processo holístico e formativo. Este OA visa acompanhar efetivamente a aprendizagem dos alunos, promovendo avanços significativos em suas trajetórias educacionais. A metodologia MOA, utilizada na concepção do OA, garante a criação de recursos educacionais digitais reutilizáveis, através de artefatos como o Mapa Conceitual, o Storyboard e o Mapa Navegacional. Esses componentes asseguram a eficácia pedagógica e a adaptabilidade do OA,

³⁷ Mestre em Educação Matemática pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Professora e Coordenadora Pedagógica pela Secretária de Educação de Juiz de Fora, Email: danidiascp07@gmail.com Orcid: [0009-0000-5583-0392](https://orcid.org/0009-0000-5583-0392)

³⁸ Doutor em Educação Matemática (UNESP - Rio Claro - SP)). Pesquisador do Departamento de Matemática, atuando no ProfMat e no Programa em Avaliação e Gestão pública (CAED-UFJF), E-mail: marco.kistemann@ufjf.br Orcid: [0000-0002-8970-3954](https://orcid.org/0000-0002-8970-3954)

tornando-o uma ferramenta valiosa para fomentar uma cultura avaliativa mais equitativa e centrada no aluno.

Palavra-chave: Avaliação Educacional. Formação de professores. Objeto de aprendizagem. Metodologia MOA

Abstract

The development of educational videos as a formative practice tool for teachers is a relevant topic in the current educational context, especially in relation to school evaluation. Evaluation should not only be a performance measurement, but a transformative element that contributes to the improvement of pedagogical practices. Therefore, it is crucial that educational institutions rethink their approaches to not only improve schooling rates, but also promote the integral education of students. In this scenario, the Pedagogical Coordinator plays an essential role in facilitating reflection and restructuring of educational practices. The Learning Object (LO) "Avaliação" emerges as an innovation, seeking to replace traditional and excluding evaluation models with a holistic and formative process. This OA aims to effectively monitor student learning, promoting significant advances in their educational trajectories. The MOA methodology, used in the conception of the LO, ensures the creation of reusable digital educational resources, through artifacts such as the Concept Map, the Storyboard and the Navigational Map. These components ensure the pedagogical effectiveness and adaptability of LO, making it a valuable tool for fostering a more equitable and student-centered evaluation culture.

Keyword: Educational Evaluation. Teacher training. Learning object. MOA Methodology

1. Introdução

A avaliação educacional permanece como um dos temas mais debatidos no cenário escolar contemporâneo, especialmente diante do desafio de conciliar a busca por excelência no ensino com o compromisso ético e político de democratizar o acesso, a permanência e o sucesso escolar. Nesse contexto, a avaliação ultrapassa a função tradicional de mensuração do desempenho discente, assumindo um papel estratégico como promotora de transformações pedagógicas e qualificação das práticas docentes.

Mais do que um mecanismo de verificação, a avaliação deve constituir-se como um processo sistemático capaz de fornecer subsídios para a tomada de decisões pedagógicas, orientando intervenções que favoreçam a aprendizagem e o desenvolvimento integral dos estudantes. As novas e complexas demandas sociais que incidem sobre as instituições escolares tornam imprescindível a revisão crítica das práticas avaliativas, de modo a superar modelos meramente classificatórios e promover uma cultura formativa, dialógica e inclusiva.

Esse movimento de reestruturação requer a análise contínua e criteriosa dos dados produzidos pelas avaliações, bem como o engajamento ativo, colaborativo e reflexivo dos professores. Nesse cenário, destaca-se a atuação do coordenador pedagógico como figura articuladora, responsável por mediar processos de reflexão coletiva, fomentar o diálogo entre os membros da comunidade escolar e contribuir para o redimensionamento das práticas docentes à luz de novos referenciais avaliativos.

É nesse contexto de transformação paradigmática que se insere o Objeto de Aprendizagem (OA) **Avalia_ação**, concebido como uma proposta inovadora destinada a promover reflexões amplas, críticas e fundamentadas sobre o processo avaliativo no ambiente escolar. O OA visa desconstruir paradigmas tradicionais ainda fortemente enraizados — frequentemente marcados por práticas excludentes, classificatórias e descontextualizadas — e, em seu lugar, propor uma abordagem avaliativa formativa, processual e integradora.

O produto educacional apresentado neste artigo integra a dissertação de mestrado desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Educação Matemática da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Produzida pela primeira autora, sob a orientação do segundo autor, a dissertação buscou articular fundamentos teóricos e práticas pedagógicas relacionadas à avaliação no ensino de Matemática, reafirmando o compromisso com a formação docente e com a inovação pedagógica no contexto da educação básica.

Ao fomentar uma nova cultura avaliativa, o Avalia_ação propõe meios para o acompanhamento mais efetivo e significativo da aprendizagem dos estudantes, contribuindo diretamente para a qualificação de seus percursos formativos. Trata-se de uma iniciativa que amplia o papel da avaliação ao vinculá-la ao desenvolvimento cognitivo, socioemocional e metacognitivo dos educandos, reforçando sua função de suporte e orientação ao processo educativo.

Assim, ao propor uma reconfiguração das práticas avaliativas, o Avalia_ção consolida-se como uma ferramenta estratégica para a construção de ambientes educacionais mais justos, inclusivos e responsivos às necessidades individuais dos alunos. Alinhado aos princípios de uma educação democrática e emancipadora, esse recurso contribui para o fortalecimento de uma escola comprometida com a aprendizagem significativa, com a participação crítica dos sujeitos e com a promoção de uma formação integral.

2. A avaliação escolar como instrumento de transformação pedagógica: fundamentos para uma prática formativa e reflexiva

A avaliação escolar tem ocupado, historicamente, um lugar central nas discussões educacionais, sobretudo no que se refere ao seu potencial de promover a aprendizagem e reconfigurar as práticas pedagógicas. Longe de se limitar à verificação pontual do desempenho discente, a avaliação assume, na contemporaneidade, um papel estratégico na transformação do trabalho docente e na construção de uma educação democrática, crítica e inclusiva (LUCKESI, 2011).

Para Luckesi (2011), o ato de avaliar deve ser compreendido como um processo contínuo, dinâmico e formativo, que ultrapassa a lógica classificatória tradicional. Trata-se de uma ação intencional voltada ao acompanhamento da aprendizagem, orientada pela tomada de decisões pedagógicas capazes de favorecer o desenvolvimento integral dos estudantes. Nessa perspectiva, a avaliação deixa de ser um fim em si mesma e passa a constituir-se como um meio para promover aprendizagens significativas, ajustando continuamente os percursos e as práticas de ensino.

Essa concepção dialoga com os apontamentos de Perrenoud (1999), ao afirmar que a avaliação formativa requer dos educadores a habilidade de identificar obstáculos, interpretar erros e mobilizar os resultados das avaliações como insumos para regular e aprimorar sua ação pedagógica. Ao defender o princípio de “avaliar para promover”, o autor propõe uma mudança cultural na escola, deslocando o foco da seleção e exclusão para a inclusão e o progresso dos alunos. Assim, a avaliação torna-se mecanismo regulador da aprendizagem e instrumento para a promoção da equidade no processo educativo.

Nesse cenário, a figura do coordenador pedagógico adquire relevância, configurando-se como mediador entre teoria e prática, entre diretrizes institucionais e desafios cotidianos do trabalho docente. Segundo Placco,

Almeida e Souza (2011), esse profissional desempenha papel fundamental na promoção da reflexão coletiva, instigando os professores a repensarem suas concepções, metodologias e formas de avaliação. Tal atuação exige escuta sensível, visão crítica e compromisso com uma formação continuada que seja, de fato, transformadora.

A esse entendimento, soma-se a perspectiva de Lück (2010), que destaca a importância da gestão participativa no espaço escolar, enfatizando a corresponsabilidade de todos os atores nos processos decisórios e reflexivos. A avaliação, enquanto campo estratégico de análise e intervenção, permite evidenciar tanto os avanços quanto as fragilidades das práticas educativas, oferecendo elementos para o aprimoramento contínuo do ensino e para a consolidação de um ambiente escolar mais democrático.

Diante das transformações paradigmáticas que atravessam a educação, torna-se cada vez mais pertinente a incorporação de tecnologias educacionais que contribuam para a formação docente e para a ressignificação das práticas avaliativas. O Objeto de Aprendizagem (OA) **Avalia_ação** constitui um exemplo de recurso digital orientado à promoção de práticas avaliativas coerentes com os princípios da avaliação formativa. Ao propor um ambiente de reflexão e formação contínua, o OA estimula análises críticas das práticas pedagógicas e favorece o desenvolvimento de competências avaliativas mais refinadas e contextualizadas.

Inspiradas nas contribuições de Libâneo (2004), compreende-se que a organização da prática pedagógica deve se pautar em princípios democráticos, na articulação entre teoria e prática e na valorização do conhecimento profissional docente. Sob essa ótica, a avaliação constitui-se como elemento integrador entre currículo, ensino e aprendizagem, desempenhando função estratégica na gestão escolar e na consolidação de projetos pedagógicos comprometidos com a formação plena dos estudantes.

Ao fomentar reflexões sobre práticas avaliativas ainda marcadas por exclusão e descontextualização, o Avalia_ação propõe romper com lógicas tradicionais de avaliação classificatória. Em substituição a essas práticas, apresenta uma abordagem processual, centrada no estudante e fundamentada na observação, intervenção pedagógica e monitoramento sistemático da aprendizagem. Essa mudança requer que os professores revisitem seus instrumentos, estratégias e temporalidades avaliativas, assegurando coerência com os objetivos educativos e potencializando práticas inclusivas e significativas.

Por fim, é necessário reconhecer que a avaliação escolar, quando concebida de forma crítica, ética e comprometida, torna-se uma poderosa aliada na construção de uma educação emancipadora. Como afirma Luckesi (2011, p. 17), “avaliar é um ato de amor e de compromisso com a construção do ser humano”. Nessa direção, o OA Avaliação contribui não apenas para o aprimoramento técnico dos docentes, mas para a consolidação de uma cultura avaliativa transformadora, orientada pela justiça social, pela equidade e pelo direito à aprendizagem de todos.

3. O Objeto de Aprendizagem (OA)

A concepção deste Objeto de Aprendizagem (OA) fundamenta-se em uma abordagem formativa contemporânea e inovadora, especialmente direcionada a docentes em exercício. Configura-se como um instrumento pedagógico com potencial catalisador, ao fomentar discussões qualificadas no campo do ensino e da aprendizagem, com ênfase na avaliação — temática de reconhecida centralidade no debate educacional atual.

Enquanto recurso educacional digital, o OA propõe o engajamento dos educadores em processos de reflexão aprofundada, favorecendo análises críticas e sistemáticas de suas práticas pedagógicas. Sua proposta central consiste em oferecer um ambiente formativo no qual os professores possam explorar a avaliação em sua complexidade, considerando a multiplicidade de dimensões que atravessam o processo educativo.

Entre tais dimensões, destacam-se os objetivos formativos, os métodos e procedimentos de avaliação, o contexto socioeducacional dos estudantes, bem como as condições e a organização estrutural do ensino. Essa abordagem holística e integradora possibilita uma compreensão ampliada e mais refinada da avaliação, concebendo-a como um sistema interdependente e multifacetado que ultrapassa a mera quantificação do desempenho discente.

Ao adotar tal perspectiva, o OA busca superar visões fragmentadas e reducionistas de avaliação — ainda presentes em muitos contextos escolares — e promover uma concepção que reconhece sua natureza dinâmica, processual e multidimensional. Nessa lógica, a avaliação deixa de ser entendida apenas como um instrumento de aferição para constituir-se como parte constitutiva do processo formativo, orientando decisões pedagógicas e favorecendo o desenvolvimento integral dos estudantes.

Além disso, o recurso tem como propósito consolidar uma cultura de reflexão contínua entre os educadores, incentivando-os a questionar paradigmas tradicionais e a incorporar práticas avaliativas mais coerentes com os princípios de uma educação crítica, inclusiva e comprometida com a aprendizagem significativa. Ao suscitar o pensamento reflexivo e estimular a adoção de abordagens inovadoras, o OA contribui não apenas para o aprimoramento profissional dos docentes, mas também para a qualificação das práticas pedagógicas no âmbito escolar.

Dessa maneira, o impacto do Objeto de Aprendizagem extrapola o espaço da sala de aula, alcançando a organização pedagógica da instituição e repercutindo na qualidade do ensino e no desempenho dos estudantes. Em síntese, o OA configura-se como uma ferramenta relevante no cenário educacional contemporâneo, ao oferecer um espaço virtual propício à reflexão, à experimentação e ao desenvolvimento profissional docente. Sua implementação apresenta potencial para impulsionar mudanças significativas nas práticas avaliativas, alinhando-as aos princípios de uma educação democrática, equitativa e centrada no estudante.

4. Metodologia

A concepção deste Objeto de Aprendizagem (OA) fundamenta-se na Metodologia de Objetos de Aprendizagem (MOA), um paradigma que se destaca pela capacidade de orientar a criação de recursos educacionais digitais altamente reutilizáveis e adaptáveis a diferentes contextos pedagógicos. Essa metodologia prioriza a elaboração de objetos didáticos flexíveis, integráveis a múltiplas propostas de ensino e capazes de promover uma aprendizagem significativa, contextualizada e alinhada às necessidades dos usuários.

A implementação da MOA demanda um processo de planejamento criterioso e sistemático, articulando dimensões pedagógicas e tecnológicas de maneira integrada. Conforme enfatiza Scortegagna (2016), essa articulação se materializa por meio da elaboração de artefatos instrucionais que orientam desde a estruturação conceitual até a definição da arquitetura de navegação do OA. Tais artefatos constituem pilares essenciais na organização, coerência e efetividade do processo formativo proposto.

Nessa perspectiva, Scortegagna (2016) destaca a importância da produção de três artefatos centrais, cada qual desempenhando uma função específica e complementar no desenvolvimento do Objeto de Aprendizagem:

1. **Mapa Conceitual** – Recurso visual que explicita, de forma gráfica, as relações entre os conceitos-chave abordados. Seu objetivo é favorecer a compreensão da estrutura cognitiva subjacente ao conteúdo, possibilitando ao aprendiz visualizar, de modo integrado, os elementos essenciais do conhecimento mobilizado.
2. **Storyboard** – Roteiro visual detalhado que organiza a sequência de apresentação dos conteúdos, das atividades e das interações previstas no OA. Esse artefato proporciona uma visão panorâmica do percurso formativo, contribuindo para a construção de um design instrucional coeso, intencional e metodologicamente consistente.
3. **Mapa Navegacional** – Instrumento que representa a arquitetura da informação e delinea as possíveis trajetórias de navegação do usuário ao longo do OA. Sua função é otimizar a experiência interativa, tornando o processo de aprendizagem mais fluido, acessível e personalizado, conforme as escolhas e necessidades do aprendiz.

A integração sinérgica desses três artefatos no processo de desenvolvimento do OA amplia sua eficácia pedagógica, garantindo coerência estrutural, clareza funcional e adaptabilidade em diferentes ambientes educacionais. Esses elementos contribuem decisivamente para a construção de um recurso robusto, dinâmico e orientado para a aprendizagem, reforçando a intencionalidade formativa da proposta.

Diante da relevância desses componentes no desenvolvimento de recursos digitais educacionais de qualidade, apresentam-se, a seguir, os elementos fundamentais que nortearam a construção deste Objeto de Aprendizagem, bem como os princípios metodológicos e formativos que estruturam sua concepção.

Figura 1: Mapa Conceitual e Mapa Navegacional



Fonte: Elaborado pela pesquisadora, 2024.

Figura 2: Storyboard



Fonte: Elaborado pela pesquisadora, 2024.

5 “GUIA DO PROFESSOR: Uma Abordagem Sistemática para a Formação em Avaliação Educacional”

O Guia do Professor: Uma Abordagem Sistemática para a Formação em Avaliação Educacional foi desenvolvido como Objeto de Aprendizagem (OA) para promover uma formação docente crítica e reflexiva em avaliação educacional. Visa incentivar a compreensão aprofundada do conceito de avaliação, capacitar professores a aplicar diferentes modalidades avaliativas de forma contextualizada e estimular a reflexão sobre o uso de instrumentos diversificados para aprimorar práticas pedagógicas e aprendizagens.

A formação pressupõe experiência prévia dos docentes em atividades avaliativas, permitindo análises situadas, identificação de necessidades e construção de estratégias pedagógicas consistentes. O encontro terá duração de três a quatro horas, com exibição de vídeo educativo seguida de discussão orientada, em formato de grupo focal, favorecendo interação e troca de experiências.

O ambiente contará com computador, projetor, internet de alta velocidade, materiais de registro individual e recursos para exposições coletivas. A mediação ficará a cargo do coordenador pedagógico, que

organizará o processo, apresentará a temática e conduzirá as atividades, estimulando reflexões críticas e interações dialógicas.

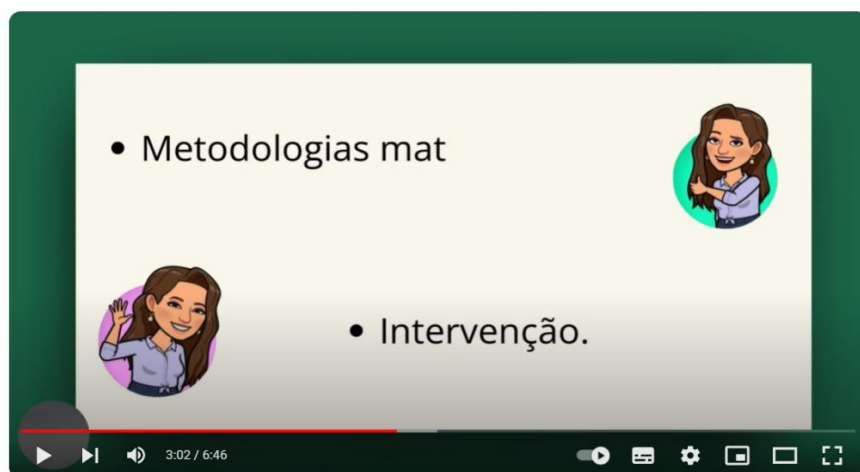
Assim, a ação formativa busca transformar qualitativamente as práticas avaliativas institucionais, alinhando-as a uma educação inclusiva, processual e voltada ao desenvolvimento integral dos estudantes.

Figura 3: Links de acesso ao Objeto de Aprendizagem

Vídeo 1 - <https://www.youtube.com/watch?v=5dO2S3GXsCk>



Vídeo 2 - <https://youtu.be/xd4UHYYhTs>



Módulo 2 - Avaliação em Matemática



Avalia_ação
4 inscritos

Analytics

Editar vídeo

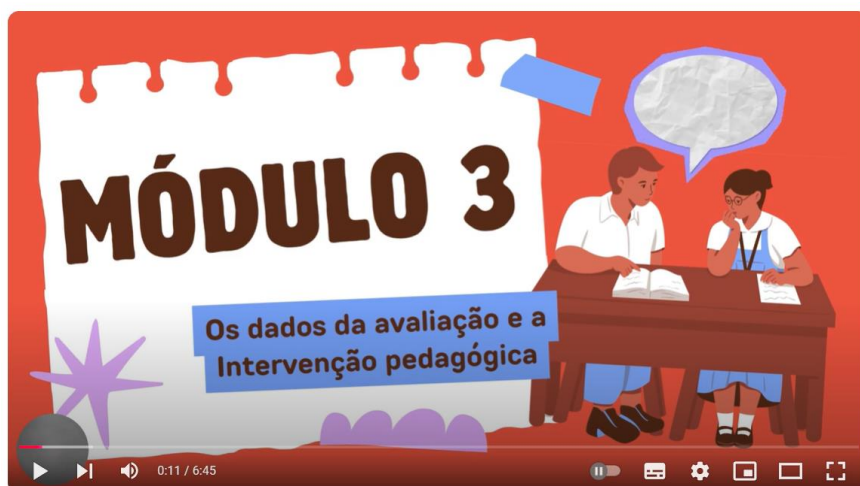
0



Compartilhar



Vídeo 3 - <https://www.youtube.com/watch?v=JeDcXQUyfVw&t=5s>



Avaliação da aprendizagem: análise dos resultados da avaliação e intervenção pedagógica



Avalia_ação
7 inscritos

Inscrito

2



Compartilhar

Download



Vídeo 4 - <https://www.youtube.com/watch?v=r3PxYyBVM-E>



O infográfico apresentado foi concebido para disseminar de forma eficiente e acessível informações relevantes à formação docente. Utilizando recursos tecnológicos contemporâneos, ele incorpora códigos QR (Quick Response), que proporcionam aos educadores acesso ágil e direto a conteúdos formativos.

A escolha do formato infográfico mostra-se estratégica em um contexto educacional cada vez mais imerso na cultura digital. Sua natureza gráfica e sintética permite condensar informações complexas em representações visuais de fácil compreensão, ampliando a clareza e a objetividade na apresentação dos dados, atendendo às demandas de uma sociedade que valoriza a comunicação visual e o uso intensivo de tecnologias digitais.

A integração dos códigos QR expande a funcionalidade do infográfico, permitindo a conexão entre o ambiente físico e o digital. Por meio de dispositivos móveis, professores podem acessar instantaneamente conteúdos complementares, como vídeos instrutivos, artigos científicos, ambientes de discussão e plataformas interativas de aprendizagem. Essa praticidade favorece os princípios da formação continuada, ao oferecer flexibilidade, autonomia e agilidade na busca por informações qualificadas.

Mais do que um instrumento de divulgação, o infográfico associado à tecnologia QR configura-se como dispositivo formativo, incentivando o protagonismo docente e promovendo uma cultura de aprendizagem autônoma, contínua e colaborativa. Isso se mostra especialmente relevante em contextos educacionais caracterizados por rápidas transformações, nos quais a constante atualização de saberes e práticas pedagógicas é imprescindível.

Outro aspecto relevante é a possibilidade de atualização periódica dos conteúdos vinculados aos códigos QR, garantindo que as informações permaneçam pertinentes, atuais e alinhadas a novas demandas e diretrizes educacionais.

Em síntese, o infográfico enriquecido com tecnologia QR transcende sua função inicial de ferramenta informativa e consolida-se como recurso estratégico para a formação docente. Ao unir acessibilidade, comunicação visual eficaz e interatividade digital, ele não apenas difunde informações, mas também motiva, inspira e capacita educadores a se engajarem ativamente em seus percursos formativos, contribuindo para a qualidade dos processos educativos.

Figura 4: Infográficos 1, 2, 3 e 4





Fonte: Elaborados pela pesquisadora, 2024

O presente projeto propõe um espaço de reflexão crítica sobre as práticas avaliativas no contexto educacional, por meio de questões norteadoras elaboradas para estimular o pensamento pedagógico e fomentar o diálogo construtivo entre os docentes. Essas questões visam destacar dimensões essenciais do processo avaliativo, promovendo a problematização das práticas vigentes e a busca por alternativas alinhadas aos princípios da avaliação formativa e inclusiva.

As questões formuladas são:

1. De que maneira os educadores planejam, estruturam e executam seus métodos avaliativos para monitorar o desenvolvimento das aprendizagens ao longo do processo formativo?
2. Como a distribuição temporal das avaliações é organizada no planejamento pedagógico e quais fundamentos orientam essa programação ao longo do ano letivo?
3. Quando são identificadas dificuldades de aprendizagem, quais estratégias de intervenção pedagógica são mobilizadas para apoiar o progresso dos estudantes?

4. Que abordagens diferenciadas têm sido empregadas para superar os obstáculos enfrentados pelos alunos no processo de ensino e aprendizagem?
5. Quais instrumentos analíticos e procedimentos metodológicos são utilizados para interpretar os resultados das avaliações e incorporá-los à reorientação da prática pedagógica?

Essas questões funcionam como um dispositivo potente para investigar as múltiplas dimensões da avaliação escolar, incentivando os professores a refletirem criticamente sobre suas escolhas metodológicas, a intencionalidade pedagógica de suas ações e as possibilidades de intervenção diante das necessidades dos estudantes. A problematização promovida contribui para práticas avaliativas mais coerentes, equitativas e centradas no desenvolvimento integral do aluno.

Entre os aspectos a serem discutidos, destacam-se a análise das modalidades avaliativas adotadas, o alinhamento dessas práticas com os objetivos educacionais, a estruturação e implementação dos métodos avaliativos e a lógica que orienta a distribuição temporal das avaliações. Outro eixo refere-se às estratégias de intervenção diante das dificuldades de aprendizagem, incluindo abordagens diferenciadas e instrumentos analíticos que subsidiam a reorientação das práticas docentes.

O processo avaliativo do programa de formação será contínuo e processual, com foco na observação, acompanhamento e análise da prática pedagógica, evidenciando transformações conceituais e metodológicas emergentes, especialmente relacionadas à condução das atividades avaliativas e ao acompanhamento do desenvolvimento cognitivo dos estudantes.

Nesse contexto, o vídeo educacional, recurso central da proposta, ultrapassa a função de transmissor de conteúdos teóricos, atuando como elemento indutor de reflexão crítica. Ao provocar revisões das práticas avaliativas à luz de referenciais contemporâneos, o vídeo contribui para o aperfeiçoamento metodológico e para a formação de comunidades de aprendizagem, ao estimular a troca de experiências, o compartilhamento de desafios e a construção coletiva de soluções pedagógicas.

A proposta formativa também se fundamenta nos princípios da educação inclusiva e equitativa, valorizando a diversidade de perfis de aprendizagem e incentivando estratégias avaliativas flexíveis e adaptativas. Ao promover a reflexão crítica, busca-se desenvolver competências docentes

voltadas à criação de instrumentos sensíveis às necessidades individuais dos estudantes, favorecendo práticas de ensino mais efetivas e significativas.

Em síntese, o projeto visa não apenas ao aprimoramento técnico dos professores na área de avaliação, mas também à transformação conceitual e metodológica de como a avaliação é compreendida e realizada. Ao estimular mudanças estruturais nas práticas avaliativas, contribui para a consolidação de um sistema educacional mais reflexivo, flexível e alinhado às demandas contemporâneas, promovendo o desenvolvimento integral e a aprendizagem de todos os estudantes.

Conclusão

A avaliação educacional contemporânea constitui um tema central no debate pedagógico, impondo às instituições escolares o desafio de equilibrar a busca pela excelência acadêmica com a promoção de valores democráticos e formativos. Nesse sentido, a avaliação escolar deve transcender a simples mensuração do desempenho discente, assumindo-se como um instrumento estratégico para induzir mudanças pedagógicas, orientar tomadas de decisão e promover a melhoria contínua da qualidade do ensino. Para alcançar tais finalidades, torna-se imprescindível que a avaliação forneça evidências consistentes que subsidiem ações de intervenção, atendendo às crescentes demandas sociais que pressionam as escolas não apenas por indicadores mais elevados, mas também por práticas que assegurem a formação integral dos estudantes.

Para que esse processo se concretize, é necessário que as instituições desenvolvam análises críticas e sistemáticas dos resultados avaliativos, contando com o engajamento ativo dos profissionais da educação. Nesse contexto, o coordenador pedagógico desempenha um papel fundamental ao articular, mediar e promover a reflexão coletiva sobre os dados provenientes das avaliações, redimensionando práticas e fortalecendo a cultura institucional de acompanhamento da aprendizagem.

O Objeto de Aprendizagem (OA) **Avalia_ação** surge como uma proposta inovadora, concebida para ampliar e qualificar o debate sobre avaliação escolar. Ao se distanciar de modelos tradicionais — frequentemente excludentes e centrados na classificação —, o Avalia_ação incorpora uma abordagem holística e formativa, orientada para o acompanhamento efetivo das aprendizagens, favorecendo avanços significativos e mensuráveis no percurso educacional dos estudantes.

Sua implementação representa um marco na consolidação de uma cultura avaliativa que não apenas mensura, mas também potencializa o desenvolvimento cognitivo, socioemocional e metacognitivo dos alunos, contribuindo para a construção de um ambiente educacional mais justo, participativo e responsivo às necessidades individuais e coletivas dos aprendizes.

Desenvolvido para professores em exercício, o OA incentiva a reflexão crítica sobre a prática avaliativa ao articular objetivos formativos, metodologias inovadoras, especificidades dos contextos socioeducacionais e a organização didático-pedagógica do ensino. Nesse processo, os educadores são convidados a problematizar suas concepções de avaliação, identificar limites e potencialidades de suas práticas e propor estratégias que promovam aprendizagens mais significativas.

A elaboração do OA fundamenta-se na Metodologia de Objetos de Aprendizagem (MOA), reconhecida por sua capacidade de gerar recursos digitais reutilizáveis e adaptáveis a diferentes cenários educacionais. A construção do Avalia_ação apoia-se em três artefatos centrais — Mapa Conceitual, Storyboard e Mapa Navegacional — que, de maneira integrada, asseguram sua coerência pedagógica, clareza estrutural e usabilidade, além de garantir sua adequação a distintos ambientes formativos.

Dessa forma, o OA **Avalia_ação** configura-se como uma ferramenta estratégica no contexto pedagógico contemporâneo, promovendo reflexão docente, experimentação didática e desenvolvimento profissional. Ao catalisar transformações significativas nas práticas avaliativas, contribui para a consolidação de uma educação mais inclusiva, emancipadora e centrada no aluno, alinhada às demandas atuais de qualidade e equidade no processo de ensinar e aprender.

Referências

- LIBÂNEO, J.C. **Organização e Gestão da Escola: Teoria e Prática**, 5. ed. Goiânia, Alternativa, 2004.
- LÜCK, Heloísa. **A Gestão Participativa na Escola**. 8ª Ed. Rio de Janeiro. Vozes, 2010.
- LUCKESI, Cipriano Carlos. **Avaliação da Aprendizagem Escolar: estudos e proposições**. 22 ed. São Paulo: Cortez, 2011.
- PERRENOUD, Philippe. **Avaliação: da excelência à regulação das aprendizagens: entre duas lógicas**. Porto Alegre: Artes médicas, 1999. 183 p.

PLACCO, V. M. N. S.; ALMEIDA, L. R.; SOUZA, V. L. T. (Coord.). **O Coordenador pedagógico e a formação de professores:** intenções, tensões e contradições. (Relatório de pesquisa desenvolvida pela Fundação Carlos Chagas por encomenda da Fundação Victor Civita). São Paulo: FVC, 2011.

SCORTEGAGNA, L. **Objetos de Aprendizagem.** 1 ed. Juiz de Fora: CEAD, 2016. v. 1.105p

12- Desafio Espacial: um modelo detalhado de educação espacial prática para o Ensino Médio público brasileiro com desenvolvimento e lançamento de picossatélite

Matheus Six Madureira Guedes³⁹

Rafael Paiva Lôbo⁴⁰

Victor Baptista⁴¹

Leonardo Souza⁴²

Paulo M. V. B. Barone⁴³

Introdução

A Educação em Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática (STEM) é reconhecida como um dos pilares para o desenvolvimento dos países e para a formação de cidadãos capazes de enfrentar os desafios do século XXI. No entanto, o acesso a experiências de aprendizagem STEM, especialmente as de alta complexidade tecnológica, ainda é muito desigual, notadamente em Escolas Públicas e regiões periféricas, o que limita o desenvolvimento do potencial de muitos jovens talentos.

Uma resposta inovadora a este cenário adverso, o projeto educacional “Desafio Espacial”, tem sido desenvolvida pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia – IBICT, em colaboração com a *startup* Ideia Space, articulando formação teórica e uma experiência prática autêntica:

³⁹ Engenheiro Eletrônico, Ideia Space, e-mail matheus@ideiaspace.com.

⁴⁰ Engenheiro Aeroespacial, Ideia Space, email rafael@ideiaspace.com.

⁴¹ Estudante de Engenharia Aeroespacial, Ideia Space, email victor@ideiaspace.com.

⁴² Estudante de Engenharia Aeroespacial, Ideia Space, email leonardo@ideiaspace.com.

⁴³ Doutor em Física, Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia e Universidade Federal de Juiz de Fora, e-mail pmvbbbarone@gmail.com, ORCID 0000-0003-1774-2716.

a construção e o lançamento de um picossatélite orbital por estudantes do Ensino Médio.

O projeto “Desafio Espacial” é composto pelos cursos “Introdução ao Espaço” e “Jornada Espacial”, aplicado a estudantes de escolas públicas do Distrito Federal, com o objetivo de democratizar o acesso à Educação em Ciência e Tecnologia Espaciais de alta qualidade, promovendo inclusão social, equidade de gênero e o desenvolvimento de competências tecnicocientíficas e socioemocionais.

Este capítulo apresenta o desenho, a implementação e a avaliação da primeira edição do projeto, culminando na construção e no lançamento de um picossatélite orbital funcional padrão PocketQube 1P.

O modelo educacional foi estruturado em dois níveis complementares: um curso introdutório de ampla abrangência, com carga horária de 8 horas, atendendo a aproximadamente 450 estudantes, e um curso de imersão intensiva, com duração de 40 horas, direcionado a 30 alunos selecionados por engajamento, desempenho e aptidão técnica. A arquitetura pedagógica fundamentou-se em metodologias ativas contemporâneas — Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL, do inglês *Problem Based Learning*), Aprendizagem Baseada em Projetos (PjBL, do inglês *Project Based Learning*), aprendizagem “mão na massa” (*hands-on*) e sala de aula invertida —, implementadas por meio de recursos didáticos especialmente desenvolvidos para o projeto, como Canvas de *design* de missão e projeto (MDR, do inglês *Mission Design Review* e PDR, do inglês *Project Design Review*), jogos educacionais interativos e *kits* de satélite educacional e orbital.

O projeto impactou diretamente 450 estudantes de cerca de 40 escolas e 11 regiões administrativas do Distrito Federal, com forte representação de Escolas Públicas (97%) e alta participação feminina (50,25% no curso introdutório e 63,3% no curso de imersão), evidenciando foco em inclusão social e equidade de gênero. Avaliações gamificadas aplicadas indicaram ganhos expressivos de aprendizagem, com aumento do desempenho médio em testes da faixa de 54–59% para a faixa de 93–100%. Evidências qualitativas, incluindo entregas formais dos Canvas MDR/PDR, assim como depoimentos, demonstram desenvolvimento consistente de pensamento crítico, visão sistêmica e contribuição para os projetos de vida dos estudantes. Do ponto de vista tecnológico, foi desenvolvido um picossatélite funcional (EduSat 1), com contrato de lançamento firmado com a empresa Alba Orbital, visando órbita SSO (*Sun-Synchronous Orbit*) de aproximadamente 525 km de altitude, com

janela de lançamento prevista para o quarto trimestre de 2025 ou primeiro trimestre de 2026. Concluímos que o modelo em dois estágios, por meio da seleção de talentos, articulado a um projeto espacial real, constitui uma estratégia eficaz, escalável e potencialmente replicável para Educação STEM inclusiva no Brasil. O capítulo discute também desafios operacionais para a oferta do projeto a estudantes de Escolas Públicas e apresenta indicações para a sua escalabilidade e sustentabilidade.

Fundamentação teórica

A proposta pedagógica do “Desafio Espacial” apoia-se em metodologias ativas contemporâneas, que conduzem o estudante ao centro do processo de aprendizagem. Entre elas, destacam-se:

- **Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL):** O estudante é protagonista na investigação de problemas autênticos e complexos, contextualizados na realidade local, utilizando dados reais de satélites para formular hipóteses e soluções (Barrows & Tamblyn, 1980).
- **Aprendizagem Baseada em Projetos (PjBL):** O processo de ensino é organizado em torno da elaboração de produtos concretos, como entregas formais de etapas de projeto, promovendo o desenvolvimento de habilidades de planejamento, execução e avaliação (Mergendoller & Thomas, 2005).
- **Aprendizagem “mão na massa” (hands-on):** Experiências práticas e experimentação com artefatos físicos, como kits de satélite educacional e montagem do picossatélite orbital, consolidam conceitos abstratos por meio da manipulação direta (Jensen, 2004).
- **Sala de aula invertida:** O estudo de conteúdos expositivos é deslocado para momentos não presenciais, liberando o tempo presencial para atividades colaborativas, discussões e resolução de problemas complexos (Moran, 2015).

Além disso, o desenvolvimento de estruturas visuais de *design* (Canvas) dialoga com princípios de *design thinking*, facilitando a estruturação iterativa e colaborativa de problemas, considerando os atores sociais relevantes e propondo soluções, de modo a desenvolver o pensamento sistêmico e interdisciplinar (Liedtka, 2018).

Metodologia

Desenho do Projeto e Arquitetura em Dois Níveis

O projeto foi estruturado como um funil de desenvolvimento de talentos, composto por dois módulos complementares:

Módulo de Amplo Alcance – “Introdução ao Espaço” (8 horas):

- Público-alvo: estudantes do Ensino Médio da rede pública do Distrito Federal.
- Carga horária: 8 horas distribuídas em sessões que combinam aulas expositivas, atividades gamificadas e dinâmicas de sensibilização.
- Escala: aproximadamente 402 estudantes atendidos em múltiplas turmas.
- Conteúdo: introdução à metodologia científica, conceitos básicos do ambiente espacial (radiação, microgravidade, órbitas), história e tipos de missões espaciais, sensibilização para carreiras e oportunidades em ciência e tecnologia espacial.
- Objetivo: despertar interesse e identificar estudantes com potencial e engajamento para o curso de imersão.

Módulo de Imersão – “Jornada Espacial” (40 horas):

- Público-alvo: 30 estudantes selecionados a partir do módulo introdutório, com base em critérios de engajamento, desempenho acadêmico e aptidão técnica.
- Carga horária: inicialmente 34 horas, ampliada para 40 horas para aprofundamento prático e teórico e continuidade das atividades preparatórias para o lançamento do picossatélite.
- Conteúdo: ciclo completo de uma missão espacial, desde o design conceitual, análise de requisitos, desenvolvimento e integração dos subsistemas do picossatélite, até testes e preparação para lançamento.
- Metodologia: forte ênfase em PBL, PjBL, hands-on e sala de aula invertida, com uso intensivo dos recursos didáticos proprietários.

Esse modelo em dois níveis permite que o curso introdutório, de menor custo e complexidade, atinja grande escala para identificar talentos, enquanto o curso de imersão concentra recursos intensivos (*hardware*, acompanhamento especializado, tempo de laboratório) em um grupo menor e altamente engajado, maximizando o impacto educacional.

O módulo “Introdução ao Espaço” foi desenvolvido em múltiplas turmas, nas próprias Escolas Públicas que participaram do Projeto. O módulo “Jornada Espacial” foi desenvolvido em ambientes cedidos por instituições

parceiras, como o Planetário de Brasília, o SESI Lab e o Instituto SESI-SENAI de Tecnologia, todos localizados na região central de Brasília, e incluíram atividades adicionais de visita às atrações disponíveis em cada um deles.

O impacto na formação dos estudantes que participam dos cursos é amplificado e estendido a outros estudantes por meio da possibilidade de uso do picossatélite para fins de comunicação. Para isso, o projeto lançou o Desafio Espacial, visando à proposição de projetos de natureza diversificada a serem desenvolvidos ao longo da vida útil do picossatélite, estimada em dois anos.

Contexto, participantes e desenvolvimento do projeto

O projeto foi implementado com foco prioritário em Escolas Públicas do Distrito Federal, abrangendo contextos socioeconômicos diversos, incluindo regiões periféricas e vulneráveis.

No total, participaram 450 estudantes de cerca de 40 instituições de ensino, distribuídas em pelo menos 11 regiões administrativas, com destaque para localidades como Brazlândia, Recanto das Emas, Paranoá e Sobradinho.

Do ponto de vista demográfico:

- curso “Introdução ao Espaço” (450 alunos): 50,25% feminino e 49,75% masculino, 100% provenientes de escolas públicas.
- curso “Jornada Espacial” (30 alunos): 63,3% feminino e 36,7% masculino, 87% de escolas públicas e 13% de escolas particulares.

Esse perfil evidencia o foco do projeto em inclusão social e equidade de gênero, promovendo a participação de meninas em áreas tradicionalmente dominadas por homens.

Para viabilizar a participação dos estudantes no curso “Jornada Espacial”, o projeto previu um calendário de aulas aos sábados ou outras datas que reduziam os conflitos com as suas atividades rotineiras, assim como um auxílio para deslocamento das suas regiões de origem, predominantemente as cidades-satélite de Brasília, até a região central da cidade.

Arquitetura Pedagógica e Metodologias Ativas

No núcleo da experiência educacional foram adotadas metodologias ativas integradas, com aplicação contextualizada e progressiva:

- PBL: problemas reais do Distrito Federal, como desafios em agricultura, monitoramento climático e comunicação, foram explorados por meio de dados reais de satélites, estimulando a formulação de hipóteses e soluções científicas.
- PjBL: as atividades foram organizadas em torno de entregas formais, como o MDR e o PDR, que exigem documentação técnica, justificativas e apresentação colaborativa, simulando processos reais de Engenharia Espacial.
- *Hands-on*: os estudantes participaram da montagem de satélites educacionais e do picosatélite orbital, manipulando componentes eletrônicos, sensores, painéis solares e sistemas de comunicação, consolidando conceitos técnicos e desenvolvendo habilidades práticas.
- Sala de aula invertida: no módulo de imersão, conteúdos teóricos foram disponibilizados previamente em formato digital, liberando o tempo presencial para atividades práticas, discussões em grupo e resolução colaborativa de problemas complexos.

Ferramentas Didáticas e Recursos Tecnológicos

Foram utilizados recursos inovadores, desenvolvidos de forma autônoma, que conduzem a progressão pedagógica do nível mais abstrato ao mais concreto:

- Canvas MCR (Ambiente Espacial): *framework* visual que auxilia os estudantes a estruturar a análise dos desafios do ambiente espacial, como radiação, vácuo e microgravidade, com base em metodologia científica, formulando hipóteses e estratégias de mitigação.
- Canvas MDR (*Mission Design Review*): ferramenta para ideação e planejamento de missões espaciais, estruturando problema, objetivos, *stakeholders*, causas e consequências, além da descrição detalhada da missão, promovendo pensamento sistêmico e interdisciplinar.
- Canvas PDR (*Project Design Review*): exclusivo do módulo de imersão, orienta a estruturação dos subsistemas do satélite (energia, comunicação, computador de bordo, estrutura, controle térmico etc.) e a justificativa técnica das escolhas de engenharia, simulando processos reais de desenvolvimento.

- Recursos gamificados: jogo da memória de missões espaciais e tabuleiro “Caça Satélites”, que promovem familiarização com missões históricas e compreensão dos desafios operacionais de forma lúdica.
- *Hardware* pedagógico: satélite educacional (kit funcional para uso em sala de aula, simulando subsistemas reais) e satélite orbital EduSat 1 (picossatélite padrão PocketQube 1P, 5×5×5 cm, até 250 g, com carga útil de armazenamento e retransmissão de dados, sistema de energia e comunicação via protocolo LoRa).

Essa progressão pedagógica — do *framework* conceitual, passando por jogos, *hardware* educacional até o artefato orbital real — permite o desenvolvimento gradual e integrado dos conhecimentos sobre Ciência e Tecnologia Espaciais, com fundamentos e ramificações em diversos campos de conhecimento conexos.

Instrumentos de Avaliação

A avaliação da aprendizagem combinou métodos quantitativos e qualitativos para medir o impacto do projeto em múltiplas dimensões:

- Avaliação quantitativa: testes gamificados aplicados na plataforma Quizizz antes e depois do módulo de imersão, com registro detalhado de pontuações e precisão média, permitindo análise estatística dos ganhos de aprendizagem.
- Avaliação qualitativa: análise criteriosa dos Canvas MDR e PDR produzidos pelos grupos, coleta de depoimentos de alunos e professores, e observação sistemática do engajamento e participação ao longo do curso.

Resultados

Evolução da Aprendizagem

Nos testes gamificados do curso “Jornada Espacial” observou-se um aumento expressivo da precisão média de 54-59% para 93-100% de acertos, dependendo do grupo avaliado.

No curso introdutório, as avaliações finais indicaram alto desempenho, com grande parcela dos alunos obtendo mais de 90% de acertos.

Do ponto de vista qualitativo, os Canvas MDR e PDR evidenciaram:

- Capacidade dos estudantes de estruturar missões espaciais complexas, envolvendo múltiplos públicos de interesse e análise crítica de causas e consequências.
- Tradução eficaz de requisitos de missão em especificações técnicas detalhadas dos subsistemas do satélite.
- Colaboração efetiva e distribuição de responsabilidades entre integrantes dos grupos.

Esses resultados sugerem desenvolvimento consistente de competências de pensamento crítico, resolução de problemas complexos e visão sistêmica, fundamentais para carreiras em STEM.

Percepção dos Alunos e seus Professores

As percepções coletadas por meio de entrevistas e questionários foram predominantemente positivas, destacando:

- alta qualidade e relevância do conteúdo ministrado;
- atratividade e engajamento proporcionados pelas atividades práticas e gamificadas;
- impacto significativo na orientação de carreira e projeto de vida dos estudantes, com depoimentos que indicam transformação pessoal, como “agora eu sei quem eu sou e para onde devo seguir”.

Professores articuladores, vinculados às Escolas dos estudantes participantes, qualificaram o material didático como de “excelente qualidade” e o curso como “magnífico” e “muito produtivo”, ressaltando a importância da articulação entre teoria e prática.

O principal desafio operacional identificado refere-se ao auxílio concedido aos participantes do módulo de imersão, uma vez que 97% dos estudantes dependiam do auxílio para deslocamento até os locais centralizados das atividades presenciais. Atrasos no repasse dos recursos financeiros para transporte geraram a maioria das dificuldades para a condução do curso. Esse fator revelou-se fundamental para a viabilidade inclusiva do projeto, pois compromete diretamente a permanência e o engajamento de alunos de baixa renda, ameaçando a sua missão de inclusão social.

Dimensão Tecnológica: Desenvolvimento e Lançamento do Picossatélite

O satélite EduSat 1 foi desenvolvido seguindo rigorosamente o padrão internacional PocketQube 1P, com dimensões compactas de 5×5×5 cm e peso máximo de 250 g, projetado para operar em órbita terrestre baixa.

Suas principais características técnicas incluem:

- carga útil: sistema *store-and-forward* para armazenamento e retransmissão de dados, permitindo comunicação intermitente com estações terrestres.
- energia: bateria interna recarregável alimentada por painéis solares de alta eficiência, garantindo autonomia energética durante a órbita.
- comunicação: enlace via protocolo LoRa, operando em frequência educacional, que possibilita comunicação de baixa potência e longo alcance.
- telemetria: sensores integrados para medição de parâmetros críticos, como temperatura interna, nível de bateria e status dos subsistemas, permitindo monitoramento remoto.

O projeto já passou pela fase de integração, incluindo montagem final do satélite, testes ambientais e integração com o sistema de separação (*deployer* AlbaPod). Posteriormente, o conjunto será integrado ao veículo lançador pela equipe da Alba Orbital, conforme cronograma próprio.

A viabilidade orbital do EduSat 1 foi formalizada por meio de contrato de serviços de lançamento (Rideshare Launch Services Contract), assinado em dezembro de 2024 com a empresa Alba Orbital Deutschland UG.

Os principais parâmetros do lançamento são os seguintes:

- órbita: Síncrona com o Sol (SSO), altitude aproximada de 525 km (± 25 km), garantindo condições estáveis para operação do satélite.
- janela de lançamento: prevista para o quarto trimestre de 2025 até o primeiro trimestre de 2026.
- lançador: missão rideshare em parceria com a SpaceX, que permite o lançamento compartilhado com outros pequenos satélites, otimizando custos.

O contrato estabelece marcos críticos rigorosos, como *kick-off*, verificação ambiental, entrega do *payload*, envio ao local de lançamento, lançamento, confirmação de ejeção e vetores de estado, introduzindo ao

ambiente educacional um cronograma de engenharia de padrão industrial, com prazos e requisitos formais.

A experiência foi amplamente disseminada no âmbito científico e acadêmico, por meio de artigo submetido e aceito em congresso da Federação Astronáutica Internacional (IAF), detalhando a metodologia e resultados da educação espacial desenvolvida.

No âmbito institucional, foi divulgado em publicações em portais oficiais como gov.br, canais do IBICT, da Ideia Space e da Agência Espacial Brasileira - AEB, destacando a participação ativa dos estudantes na construção do satélite e o caráter pioneiro do projeto no Brasil. Recebeu também atenção da imprensa nacional.

Essa divulgação reforça o impacto científico, educacional e social e da iniciativa, ampliando sua visibilidade e seu potencial para parcerias futuras.

Discussão

Os resultados indicam que a combinação integrada de (i) um modelo em dois níveis (curso introdutório de amplo alcance com curso de imersão intensiva), com (ii) o uso de metodologias ativas de aprendizagem, bem estruturadas e progressivas, e de recursos didáticos próprios, alinhados à progressão conceitual e prática, além de (iii) um projeto tecnológico real, com o lançamento do picossatélite cria um ambiente de aprendizagem altamente motivador, com ganhos de aprendizagem mensuráveis e impactos significativos na formação, no desenvolvimento de interesses, na identidade e na trajetória de carreira dos estudantes.

O equilíbrio de gênero, com predominância feminina no módulo de imersão, merece destaque por desafiar estereótipos de gênero em STEM, apontando o modelo como promissor para incremento da participação de meninas em áreas científicas e tecnológicas.

Por outro lado, a experiência também evidencia que o apoio socioeconômico, especialmente o auxílio-transporte, é tão importante quanto o desenho pedagógico: sem garantia de deslocamento, a participação de alunos de baixa renda é ameaçada, comprometendo a missão de inclusão social e a sustentabilidade do projeto.

Recomendações

Com base na análise detalhada dos resultados e desafios do projeto “Desafio Espacial”, propomos as seguintes recomendações para garantir a escalabilidade, a sustentabilidade e o impacto ampliado do modelo educacional:

1. Formalização e institucionalização do projeto em múltiplos ambientes educacionais

- Estabelecer parcerias formais e duradouras com Secretarias de Educação do Distrito Federal e demais entes federativos para incorporar o modelo “Introdução ao Espaço” seguido do curso de imersão “Jornada Espacial” como parte das políticas públicas educacionais, integrada.
- Garantir oferta contínua, previsível e integrada ao currículo escolar e às demais atividades desenvolvidas nas redes de Escolas participantes, com cronogramas anuais definidos, favorecendo a participação dos estudantes.

2. Otimização da logística de apoio socioeconômico

- Implementar mecanismos ágeis e eficientes para o auxílio-transporte dos estudantes, tais como cartões pré-pagos recarregáveis, antecipação dos pagamentos e equipe administrativa dedicada à gestão logística.
- Avaliar a possibilidade de descentralizar parte das atividades práticas para polos regionais, reduzindo a necessidade de deslocamentos longos e facilitando a inclusão de estudantes de áreas periféricas.

3. Valorização, aprimoramento e disseminação dos recursos didáticos

- Continuar o refinamento dos canvas (MCR, MDR, PDR), jogos educacionais e kits de satélite com base em *feedback* contínuo de estudantes, professores e especialistas, assegurando atualização tecnológica e pedagógica.
- Desenvolver atividades de formação e capacitação para professores multiplicadores, ampliando a rede de educadores aptos a aplicar o modelo em diferentes contextos.
- Explorar modelos de licenciamento aberto ou comercial para os recursos didáticos, buscando parcerias com instituições educacionais e empresas para garantir sustentabilidade financeira e expansão do alcance.

4. Estratégia de comunicação e engajamento pós-lançamento

- Planejar a utilização contínua da missão orbital do EduSat 1, desenvolvendo os “Desafios Espaciais” propostos pelos participantes da primeira edição do projeto e traduzindo dados de telemetria e operação em conteúdos acessíveis e interativos para estudantes, escolas e comunidade em geral.
- Promover eventos periódicos de acompanhamento da missão, envolvendo alunos, professores, familiares e parceiros, reforçando o ciclo completo de aprendizagem “da sala de aula à órbita”.
- Utilizar mídias digitais, redes sociais e plataformas educacionais para ampliar o impacto e inspirar novas gerações a se engajarem em projetos de Educação em Ciência e Tecnologia na Escola Básica.

5. Ampliação da diversidade e inclusão

- Intensificar ações afirmativas para ampliar a participação de grupos sub-representados em STEM, como meninas, estudantes de regiões periféricas e minorias étnico-raciais, garantindo equidade no acesso e permanência.
- Incorporar conteúdos e abordagens que dialoguem com as realidades locais e promovam a conexão entre tecnologia espacial e temas transversais, como sustentabilidade ambiental e saúde pública, ampliando a relevância social do projeto.
- Avaliar os benefícios obtidos com a inclusão de estudantes pertencentes a grupos com necessidades educacionais específicas.

Considerações finais

O projeto “Desafio Espacial” comprova que é possível oferecer a estudantes do Ensino Médio público uma experiência robusta em Ciência e Tecnologia Espaciais, envolvendo desde fundamentos teóricos até a participação direta em um projeto de satélite real com lançamento efetivamente realizado.

Os resultados educativos — quantitativos e qualitativos —, aliados à escala de alcance e à inclusão social e de gênero, indicam que o modelo é eficaz e potencialmente replicável em outros contextos. A experiência também evidencia que a integração entre educação, pesquisa aplicada e indústria espacial cria oportunidades únicas de aprendizagem significativa e engajadora.

O avanço para a fase de lançamento e operação orbital do EduSat 1 representa não apenas um marco tecnológico, mas um patrimônio formativo para os estudantes envolvidos e um argumento forte em favor da ampliação de iniciativas semelhantes no Brasil e em outros países.

Agradecimentos

Agradecemos aos estudantes, professores e parceiros que contribuíram para o sucesso do projeto “Desafio Espacial”, tornando possível a realização de uma experiência educacional transformadora e inspiradora.

Agradecemos também ao Planetário de Brasília, ao SESI Lab, ao Instituto SESI SENAI de Tecnologias Educacionais, à Agência Espacial Brasileira, pela parceria no projeto, e ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação, pela aplicação de emenda orçamentária que viabilizou a realização desta edição.

Referências

- Barrows, H. S., & Tamblyn, R. M. (1980). **Problem-based learning: An approach to medical education**. Springer.
- Jensen, D. (2004, June). A design methodology for hands-on classroom experiences. In **2004 ASEE Annual Conference & Exposition** (pp. 9–34).
- Liedtka, J. (2018). Why design thinking works. **Harvard Business Review**, 96(5), 72–79.
- Mergendoller, J. R., & Thomas, J. W. (2005). **Managing project-based learning: Principles from the field**. Novato, CA: Buck Institute for Education.
- Moran, J. M. (2015). Metodologias ativas para uma educação inovadora: Contextos e práticas educacionais. In **Metodologias ativas para uma educação inovadora** (pp. 15–33). Porto Alegre: Penso.

13- Desenvolvimento de uma matriz de sensores de pixels ativos usando o PDK Sky130 e ferramentas de código aberto

Luís Karlos Mendes de Oliveira⁴⁴

Estêvão Coelho Teixeira⁴⁵

Filipe Vinci dos Santos⁴⁶

Introdução

Os sensores de pixel ativos, ou APS (*Active Pixel Sensors*), são as estruturas básicas dos imageadores CMOS, presentes em uma grande quantidade de câmeras digitais, tanto para aplicações gerais (p.ex. câmeras de celular) como para aplicações específicas, como imageadores para segurança, aplicações médicas e científicas, dentre outras (Freitas; Morgado-Dias, 2020). A sua origem remonta a 1992, com o trabalho desenvolvido pelos pesquisadores do Jet Propulsion Laboratory (JPL) da NASA (Fossum, 1997). À época, o APS se apresentou como alternativa aos sensores CCD (*Charge-Coupled Devices*), que ainda predominavam e exibiam melhores indicadores de performance em relação à qualidade da imagem produzida.

O grande diferencial do APS em relação ao CCD, e motivo para o investimento no desenvolvimento da tecnologia, foi a possibilidade de integração do sensor em um chip contendo toda a eletrônica de leitura, em tecnologia CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), a tecnologia predominante na quase totalidade dos chips atuais. Com isso, viabilizou-se o conceito de *Camera on Chip* (Fossum, 1998), já que toda a lógica de acesso aos

⁴⁴ Graduando em Engenharia Elétrica – Sistemas Eletrônicos pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). E-mail: luis.karlos@estudante.ufjf.br Orcid: 0009-0003-0646-3057

⁴⁵ Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Professor do Departamento de Circuitos Elétricos da UFJF. E-mail: estevao.teixeira@ufjf.br Orcid: 0000-0002-4513-8877.

⁴⁶ Doutor em Física-Microeletrônica pela Université Joseph Fourier Grenoble I. Diretor da Vinci Consulting. E-mail: filipe@laposte.net Orcid: 0000-0003-2966-7071.

pixels, leitura e mesmo processamento e digitalização dos sinais poderia ser implementada em um único circuito integrado (CI).

Desde então, numerosas publicações vêm sendo produzidas, reportando avanços da tecnologia de imageadores CMOS em relação à redução de ruído (Freitas; Morgado-Dias, 2022), aumento da faixa dinâmica (Teixeira; Santos; Mesquita, 2010) e possibilidade de processamento *In-pixel* (Gamal; Yang; Fowler, 1999), dentre outros avanços.

Num sensor de imageamento, um pixel é a célula fundamental da matriz que captura a imagem. O pixel APS básico possui, além de um elemento fotossensível (fotodiodo, em geral), pelo menos três transistores responsáveis pelas funções de reinicialização da tensão (*Reset*) do nó fotossensível, pela leitura da tensão e pela seleção do pixel em questão. Esta arquitetura é chamada de pixel 3T, por conter três transistores por pixel. Diversas variações desta configuração surgiram ao longo do tempo, com a inclusão de outros transistores no pixel visando aprimorar a leitura ou digitalizar o sinal no próprio pixel. Em casos de processamento *In-pixel*, são relatados na literatura sensores APS com mais de 20 transistores por pixel (Nunes, 2012).

O maior inconveniente (custo) do uso de uma eletrônica mais complexa dentro de cada pixel é a redução relativa da área fotossensível, que é o que define a eficiência ótica efetiva da matriz. Esta eficiência pode ser expressa como fator de preenchimento (*fill factor*) e é um parâmetro muito importante para a maior parte das aplicações, dentre elas as espaciais (Liebe et al., 2002). De qualquer forma, dominar o princípio de funcionamento do pixel 3T, entender sua lógica de leitura e as diferentes figuras de mérito relativas a sensores de imagem, é o princípio norteador para o estudante e o pesquisador que se proponha a desenvolver imageadores integrados em tecnologias de fabricação CMOS.

Para o projeto de sensores APS, bem como para o projeto de qualquer circuito integrado CMOS analógico, digital ou misto (o APS se enquadra nessa categoria, pois contém circuitos analógicos e digitais), é necessário o uso de ferramentas de projeto de circuitos integrados assistidas por computador (CAD – *Computer Aided Design*) para EDA (*Electronic Design Automation*) especializadas, bem como o acesso a um conjunto de arquivos de configuração do ambiente de projeto (*Process Design Kit* — PDK) de um determinado fabricante (denominado *foundry*, no caso de semicondutores). Este PDK é um conjunto de arquivos, documentação, bibliotecas de dispositivos e modelos validados pelo fabricante da tecnologia CMOS necessários para se projetar,

simular e fazer verificações no projeto de um CI em um determinado processo de fabricação. O acesso a estes pacotes de dados e de ferramentas sempre foi condicionado a assinatura de contratos específicos restringindo a divulgação do conteúdo, assim como aprovação de órgãos governamentais de controle de exportações estratégicas.

O acesso às ferramentas e ao PDK representavam, até há poucos anos, um empecilho para o projeto de um chip em um processo de fabricação comercialmente disponível por parte de estudantes de graduação, porque as ferramentas comerciais (*softwares*) nem sempre são acessíveis, exigindo licenças que, mesmo para programas universitários de acesso facilitado, ainda possuem um custo elevado. Ao mesmo tempo, o PDK era acessível somente mediante assinatura de um termo de confidencialidade (NDA – *non-disclosure agreement*), o que normalmente seria facultado apenas aos alunos de pós-graduação. Recorria-se às vezes, para fins didáticos, a PDKs não manufacturáveis (tecnologias virtuais), ou seja, que não poderiam ser usados no projeto de um chip real.

Em 2020, uma parceria da Google com a *foundry* SkyWater iniciou um programa para fabricação gratuita de circuitos integrados (chips) usando ferramentas CAD EDA gratuitas e abertas. O processo de fabricação adotado nessa iniciativa foi o processo híbrido CMOS SkyWater de 130 nm, referenciado, abreviadamente, como Sky130 (SkyWater, 2020b). Ainda que a fabricação gratuita no Sky130 tenha se limitado, a oito rodadas (*runs*), um importante passo foi dado: a disponibilização gratuita e aberta do PDK de um processo comercial (SkyWater, 2020a), incentivando numerosos pesquisadores, estudantes e até entusiastas a projetarem seus próprios chips.

Como mencionado, esta iniciativa também previu o emprego de ferramentas de código aberto (*Open-Source*) para o projeto, simulações e verificações, evitando assim a necessidade de *softwares* comerciais. Dessa forma, o programa possibilitou uma democratização do projeto de circuitos integrados, responsáveis pelo grande salto tecnológico impulsionado pela Microeletrônica nas últimas décadas e pela produção de itens com alto valor agregado.

Uma consulta à base de dados IEEE Xplore (www.ieeexplore.com) mostra diversos trabalhos publicados resultantes do uso do referido PDK, como, por exemplo, em (Pajkanović, 2021) e (Patel; Naik, 2022) para circuitos analógicos, (Tang et al., 2021) para circuitos digitais e (Tran *et al.*, 2021) para circuitos mistos (analógicos e digitais). Também em eventos recentes

realizados no país, foram apresentados trabalhos que fizeram uso do PDK Sky130, como em (Oliveira; Brito-Filho, 2022) e (Gilo; Brito-Filho, 2023).

Neste capítulo, descrevemos o estudo, projeto, simulação e desenho da máscara para fabricação de uma matriz de pixels ativos, usando o PDK Sky130 e ferramentas de código aberto, resultado do trabalho realizado em dois projetos de Iniciação Científica da Universidade Federal de Juiz de Fora (Departamento de Circuitos Elétricos), em colaboração com a Vinci Consulting (Gif-sur-Yvette, França). Entre os resultados destes projetos, dois trabalhos foram publicados, em (Oliveira; Teixeira; Santos, 2024, 2025).

Nas seções que se seguem, serão apresentadas: a estrutura do pixel 3T; a descrição sucinta do PDK Sky130 e das ferramentas de código aberto; o estudo da linearidade e excursão do sinal de saída para diferentes pixels implementados com elementos do PDK; o *layout* e simulação de uma matriz reduzida de 2x2 pixels, bem como seu circuito de leitura; uma discussão de resultados, apontando para trabalhos futuros e, finalmente, a conclusão do trabalho.

Estrutura do pixel 3T

Um circuito integrado (chip) sensor de imagem moderno é tipicamente fabricado em tecnologia CMOS, e consiste de maneira geral em três grandes blocos; a matriz de elementos sensores (pixels), o circuito de leitura e conversão analógico-digital da tensão de saída de cada coluna, e a lógica digital de controle e comunicação digital com o exterior do chip. Cada um destes blocos necessitaria um capítulo, ou mesmo um livro completo para uma descrição detalhada.

Nosso projeto almeja realizar todos estes blocos num único chip monolítico, mas a estrutura determinante para o desempenho global é o pixel. Existem muitas variações possíveis de arquitetura interna de pixels, indo do elemento fotossensível (fotodiodo, fototransistor MOS (*Metal-Oxide-Semiconductor*) ou não, etc.) ao circuito de leitura do sinal produzido. Nosso dispositivo fotossensível é o pixel integrador de luz usando fotodiodo reversamente polarizado.

Este tipo de fotossensor é baseado na descarga da tensão de uma junção p-n reversamente polarizada provocada pelos pares elétron-lacuna geradas no substrato semiconductor em silício pelos fótons incidentes (Stefanov, 2022). A utilização deste sensor tem três fases: polarização (*reset* da tensão reversa),

integração (descarga da tensão reversa) e leitura (transferência da tensão final para o exterior do pixel).

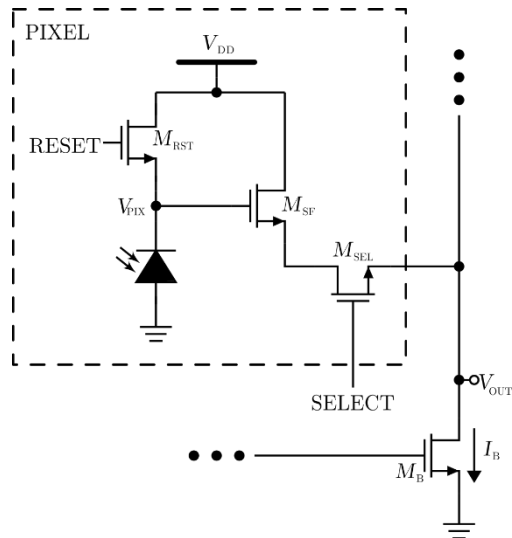
Num pixel ativo, os circuitos eletrônicos responsáveis pela primeira e terceira fase estão no interior do pixel, adjacentes ao fotossensor responsável pela segunda fase de operação. A área do pixel que não participa na integração tem de ser protegida da luz com uma camada opaca (tipicamente em metal – p.ex. alumínio), e reduz a sensibilidade global da matriz. A relação entre a área útil (para fotoconversão) e a área total é o fator de preenchimento (*fill factor*). Maximizar o *fill factor* limita os circuitos de *reset* e de leitura às estruturas com o menor *layout* possível.

Numa tecnologia CMOS moderna, em substrato em silício com dopagem P, o circuito de menor dimensão possível usa apenas transistores NMOS, com um transistor para *reset*, um transistor para isolar e transferir a tensão final em direção a saída e um transistor de seleção conectando o pixel no barramento analógico comum a todos os pixels na mesma coluna. Por conter três transistores, este pixel é chamado de 3T. O esquemático do pixel 3T é mostrado na Figura 1.

Esta arquitetura é simples e eficaz, e tem apenas o inconveniente de não ser possível capturar a tensão final de integração dos fótons simultaneamente em toda a matriz. Para fazer isto, pixels modernos utilizam um quarto transistor (pelo menos), o pixel 4T. A estrutura 4T necessita de modificações específicas no processo de fabricação, que não estão disponíveis (ainda) na tecnologia Sky130.

O sinal RESET é global a toda a matriz, e o transistor de *reset* funciona simplesmente como um interruptor conectando ou não o fotodiodo a uma tensão de alimentação positiva. O sinal SELECT é comum a todos os pixels na mesma linha da matriz (por vezes chamado de ROWSEL – seleção de linha) e aciona o transistor de seleção, que funciona também como interruptor. Então, estes dois transistores logicamente podem ter dimensões mínimas permitidas pelo processo. O último transistor funciona como um seguidor de fonte (*source follower* – SF) e copia a tensão final do elemento sensível para fora, com um desnível (*offset*) teoricamente fixo entre a porta (*gate*) e a fonte (*source*) do transistor de leitura M_{SF} .

Figura 1: Estrutura do pixel 3T-APS.



Fonte: Autores (2025).

O transistor M_{SF} é polarizado por uma fonte de corrente fixa comum à todos os pixels na mesma coluna, e considerada como fora da matriz. A justaposição deste pixel em linhas e colunas compõe a matriz que transforma a imagem em um “tabuleiro” enorme de tensões (variando de dezenas a centenas de milivolts), que tem de ser rapidamente amplificadas, digitalizadas e transferidas para fora do chip antes que uma nova imagem possa ser capturada. O escopo deste capítulo é restrito ao funcionamento e caracterização do pixel. Um trabalho que descreve o projeto da lógica de leitura dos pixels usando o PDK Sky130 pode ser encontrado em (Souza; Pereira; Teixeira, 2024).

O PDK Sky130

O processo Sky130, da *foundry* SkyWater, foi originalmente desenvolvido pela Cypress Semiconductor, e é um processo CMOS híbrido de 130-180 nm. É considerado, portanto, um “nó tecnológico maduro”, já que, no ano de 2025, tem-se, no estado da arte, processos de 3 nm, embora essa métrica não tenha, atualmente, relação direta com o comprimento mínimo de canal do MOSFET, inclusive devido às características construtivas dos dispositivos avançados.

Tal fato não torna o processo obsoleto. Pelo contrário, os nós maduros apresentam, para muitas aplicações, uma relação custo-benefício adequada, como aplicações automotivas.

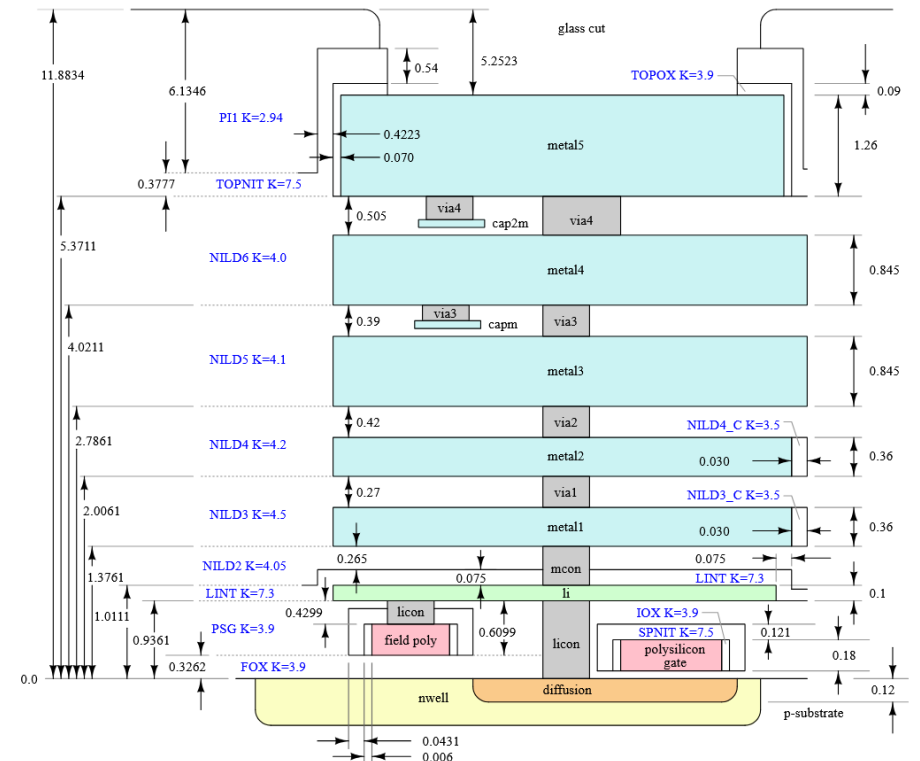
O PDK Sky130 apresenta todos os recursos necessários para o projeto de um CI na referida tecnologia. Tornou-se muito conhecido por ter sido o primeiro PDK aberto, através da parceria da Google com a SkyWater. Após este, surgiram outros PDKs abertos, como o GF180MCU, da Global Foundries, e o SG13G2, da *foundry* IHP. Este capítulo é focado apenas no PDK Sky130, devido à proposta inicial do estudo do APS ter sido direcionada para este processo.

Em linhas gerais, o processo Sky130 se caracteriza por:

- Dispositivos para operação com tensão nominal de 1,8 V, com dispositivos capazes de operar com tensões de 5,0 V.
- Um nível de interconexão local (*local interconnect*, LI).
- Cinco níveis de metal.
- Capacidade de projeto de indutores.
- Possibilidade de projeto de resistores de polisilício de alta resistividade.
- Possibilidade de implementação de capacitores metal-metal (MiM).
- Possibilidade de integração de células SONOS (*silicon-oxide-nitride-oxide-silicon*), usadas para implementação de memórias não-voláteis.
- Suporte a fontes reguladas de 10 V.
- Possibilidade de dispositivos NMOS e PMOS para tensões elevadas (p.ex. 20 V).

A representação de uma seção transversal de um chip (*process stack*) na tecnologia Sky130 é apresentada na Figura 2. A camada de interconexão local (*local interconnect*) é confeccionada em nitreto de titânio, e não é usual em processos CMOS tradicionais. É uma camada essencial, porque não há conexão direta do polisilício ou das difusões no material semiconductor diretamente com o Metal 1. No entanto, deve ser usada em conexões curtas, devido à sua alta resistividade, se comparada com uma camada de metal.

Figura 2: Vista transversal de um chip (*process stack*) fabricado no processo Sky130, com as distâncias entre as diferentes camadas (desenho fora de escala).



Fonte: Criteria & Assumptions - SkyWater (2020).

Ferramentas EDA de código aberto

O PDK aberto da SkyWater foi desenvolvido para ser usado com ferramentas EDA (*Electronic Design Automation*) também de código aberto, o que possibilita não só o acesso amplo a tais ferramentas como também a adaptação das mesmas pelos desenvolvedores, pelo acesso aos seus códigos-fonte. Uma edição especial da IEEE Design & Test Magazine foi publicada em 2021 a respeito das ferramentas EDA abertas (IEEE, 2021).

Uma grande quantidade de ferramentas pode ser usada, tanto no projeto analógico como no digital. As ferramentas usadas neste trabalho são descritas a seguir.

➤ **XSCHEM:** é um editor de diagramas esquemáticos, geração da *netlist* (arquivo de texto contendo os componentes e a forma como estão interligados, além das diretivas de simulação e chamada para bibliotecas e modelos) e interface com o programa de simulação. Possui uma grande variedade de recursos, como a possibilidade de visualização (opcional) de gráficos de formas de onda na própria interface onde se encontra o esquemático, dentre outras. Além dos símbolos genéricos (fontes de tensão, símbolos de VDD e GND, resistores, capacitores), através do PDK usa-se os símbolos específicos para os dispositivos eletrônicos passivos e ativos (transistores, diodos e fotodiodo) disponíveis na tecnologia Sky130.

➤ **NGSPICE:** é um simulador elétrico do tipo SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*), com diversos recursos de simulação. Incorpora inclusive a funcionalidade de simulação mista digital/análogica, carregando arquivos de circuitos digitais descritos em Verilog. Os dados de entrada do NGSPICE consistem numa *netlist*, gerada pelo editor de esquemáticos XSCHEM ou pela extração a partir do desenho da máscara de fabricação (*layout*).

➤ **Gaw:** é um visualizador de formas de onda, chamado a partir do XSCHEM, que recebe como entrada o arquivo de saída .RAW gerado pela simulação no NGSPICE. Possui recursos como o uso de cursores para comparar valores de sinais diferentes ou no mesmo sinal. Não é, no entanto, o único recurso para visualizar os sinais.

➤ **Magic:** é uma ferramenta para desenho de *layouts*, o conjunto de geometrias das diferentes camadas a serem fabricadas para implementação do circuito em forma de chip, cuja origem remonta à década de 1980. A interface gráfica, portanto, é bastante diferente do usual para os usuários de softwares concebidos para sistemas Windows ou distribuições modernas do Linux. O Magic sofreu uma atualização (*upgrade*) especialmente para ser usado com o PDK Sky130, contando com um recurso para geração semi-automática de máscaras de dispositivos eletrônicos, parametrizáveis. Além disso, através do Magic é possível executar também a extração do circuito eletrônico equivalente à partir do *layout*, incluindo a extração de elementos parasitas e também a verificação da adequação das máscaras desenhadas às regras DRC (*design rule checking*). A etapa DRC é responsável por verificar se um *layout* se encontra de acordo com as regras de projeto para uma determinada tecnologia, *i.e.* se a fabricação é viável. Assim, apesar da interface relativamente de difícil manuseio, é uma ferramenta crucial sob diversos aspectos.

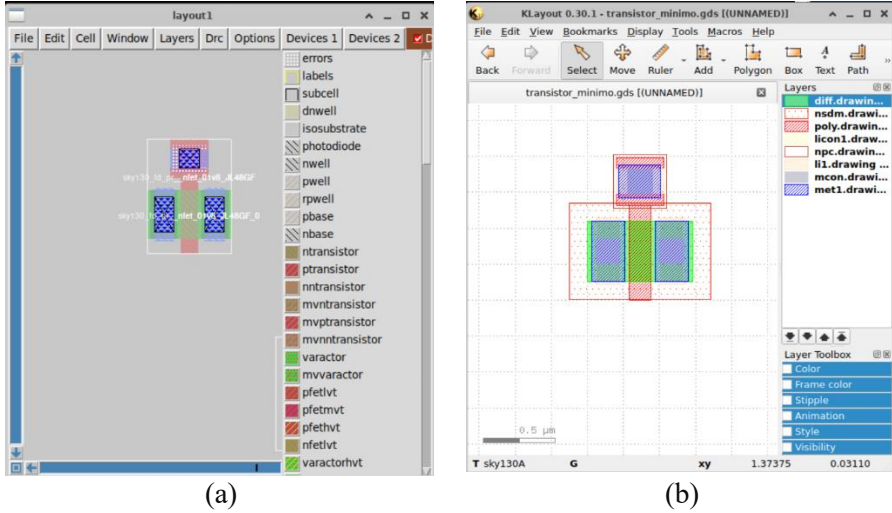
➤ **KLayout:** é uma ferramenta para visualização, edição e verificação de *layouts* mais moderna, mais similar às ferramentas comerciais. Dessa forma, trabalhar com o KLayout aumenta a produtividade, a menos que o usuário já esteja há algum tempo acostumado com a interface do Magic. O método adotado neste trabalho foi a geração semi-automática dos dispositivos no Magic, que eram em seguida exportados para o formato .GDS e depois lidos e editados no KLayout. No KLayout, foram feitas as conexões com metais entre os transistores e fotodiodo. Também é possível, no KLayout, usar *scripts* automatizados para geração de componentes, mas isso não foi aplicado a este trabalho, sendo deixado para trabalhos futuros. A Figura 3 mostra um dispositivo NMOS mínimo visualizado tanto no Magic como no KLayout. Nesse caso, o dispositivo foi gerado de forma parametrizada no Magic, e posteriormente exportado para o formato GDS, e aberto no KLayout.

➤ **Netgen:** compara duas *netlists* distintas, a gerada pelo XSCHM, advinda da captura do esquemático, e a gerada pelo Magic, advinda da extração do *layout*. Essa verificação é denominada LVS (*layout versus schematic*), e quaisquer inconsistências entre as *netlists* são reportadas pelo Netgen. Isso permite detectar conexões incorretas entre componentes, por exemplo, ainda que essas possam não ser detectadas pela análise DRC. De fato, as verificações DRC e LVS são distintas e complementares, ambas necessárias para a fabricação correta do chip.

As ferramentas descritas foram criadas para o sistema operacional Linux. Uma etapa que pode ser trabalhosa é o processo de instalação e configuração dessas ferramentas separadamente em uma máquina rodando Linux, além da própria instalação do PDK. Em muitos casos, é necessário instalar várias dependências para instalar e executar um determinado aplicativo. O lançamento do contêiner IIC-OSIC-TOOLS, criado por pesquisadores da Johannes Kepler University (JKU) e destinado ao projeto de circuitos integrados usando os PDKs abertos, facilitou consideravelmente essa etapa (Johannes Kepler University, 2023).

O contêiner funciona de uma forma análoga a uma máquina virtual Linux, embora tecnicamente sejam conceitos diferentes. No contêiner IIC-OSIC-TOOLS, tem-se instalados os três PDKs abertos, e todos os softwares usados tanto no projeto analógico como no projeto digital. O contêiner, por sua vez, pode ser instalado, através do *software* Docker, em uma máquina Windows, desde que habilitada a virtualização da CPU, o que normalmente está disponível nos computadores com Windows 11.

Figura 3: Um NMOS gerado de forma parametrizada no Magic (a), e lido, através do arquivo .GDS, no KLayout (b).



Fonte: Autores (2025).

Estudo da linearidade dos pixels usando o PDK Sky130

O PDK Sky130 apresenta uma grande variedade de transistores, entre eles: o transistor 1.8 V NMOS FET (std_1v8) com comprimento de canal mínimo $L = 0,15 \mu\text{m}$, que é o dispositivo padrão desta tecnologia da SkyWater; o transistor 1.8 V low-VT NMOS FET (1v8_lvt) que também possui um comprimento de canal mínimo $L = 0,15 \mu\text{m}$ e é construído fazendo-se um ajuste nos implantes V_{tn} o que resulta num dispositivo com baixas tensões de limiar; o transistor 3.0 V native NMOS FET (3v3_ntv) que é o transistor nativo do Sky130 com comprimento de canal mínimo $L = 0,5 \mu\text{m}$, construído fazendo-se um bloqueio em todos os implantes V_{tn} resultando em um transistor com tensão de limiar ainda menor do que o do transistor 1v8_lvt; e o transistor 5.0V/10.5V NMOS FET (5v0_std), um dispositivo capaz de suportar tensões maiores do que os anteriores, sendo $V_{GS(max)} = 5,5 \text{ V}$, $V_{BS(max)} = -5,5 \text{ V}$ e $V_{DS(max)} = 11 \text{ V}$, e cujo comprimento de canal mínimo é $L = 0,5 \mu\text{m}$.

Foram investigados em (Oliveira; Teixeira; Santos, 2024) seis diferentes arranjos para os transistores M_{SEL} , M_{SF} e M_{RST} indicados na Tabela 1, onde a razão de aspecto (W/L) em ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$) se encontra entre parênteses. Procurava-se o melhor compromisso entre uma maior excursão no sinal de

saída, *i.e.* maiores Δv_{out} , e linearidade deste sinal. Quanto maior a excursão do sinal de saída, maior a sensibilidade do sensor de imagem.

Tabela 1: Modelos dos transistores de cada configuração.

CONFIG.	M_{RST}	M_{SF}	M_{SEL}
I	1v8_std (1/0,2)	1v8_std (1/0,4)	1v8_std (1/0,2)
II	1v8_lvt (1/0,2)	1v8_lvt (1/0,4)	1v8_lvt (1/0,2)
III	1v8_lvt (1/0,2)	3v3_ntv (1/0,5)	5v0_std (1/0,5)
IV	5v0_std (1/0,5)	5v0_std (1/0,5)	5v0_std (1/0,5)
V	5v0_std (1/0,5)	3v3_ntv (1/0,5)	5v0_std (1/0,5)
VI	5v0_std (1/0,5)	3v3_ntv (1/0,5)	5v0_std (1/0,5)

Fonte: Autores (2025).

Na primeira configuração foi utilizado apenas os dispositivos 1v8_std, na segunda configuração usou-se apenas os transistores 1v8_lvt e na quarta apenas os transistores 5v0_std. As configurações III, V e VI fizeram uso do transistor nativo e, como a baixíssima tensão de limiar deste transistor impede seu funcionamento adequado como chave (podendo ficar ativo mesmo com tensões próximas de 0 na porta), utilizou-se os transistores 1v8_lvt e 5v0_std nas configurações III, V e VI para este papel. A diferença entre as configurações V e VI estava na tensão usada para o acionamento do transistor M_{SEL} , sendo de 3,3 V na configuração V e de 5,0 V na configuração VI.

Para todos os transistores da Tabela 1 foi escolhida uma largura de canal $W = 1 \mu m$ para facilitar a comparação do desempenho entre as configurações propostas. Já para o comprimento do canal L , foram escolhidas as dimensões mínimas para os transistores 3v3_ntv e 5v0_std. Enquanto, para os transistores 1v8_std e 1v8_lvt foi selecionado $L = 0,2 \mu m$ para os transistores que operam como chave, *i.e.* M_{SEL} e M_{RST} , e $L = 0,4 \mu m$ para os transistores M_{SF} de leitura. A escolha de utilizar dimensões maiores do que a mínima para os transistores 1v8_std e 1v8_lvt busca reduzir o efeito de modulação do comprimento de canal, que acrescenta uma não linearidade na tensão de saída devido a uma diminuição da resistência do canal com o aumento da queda de tensão V_{DS} (tensão entre dreno e fonte do transistor).

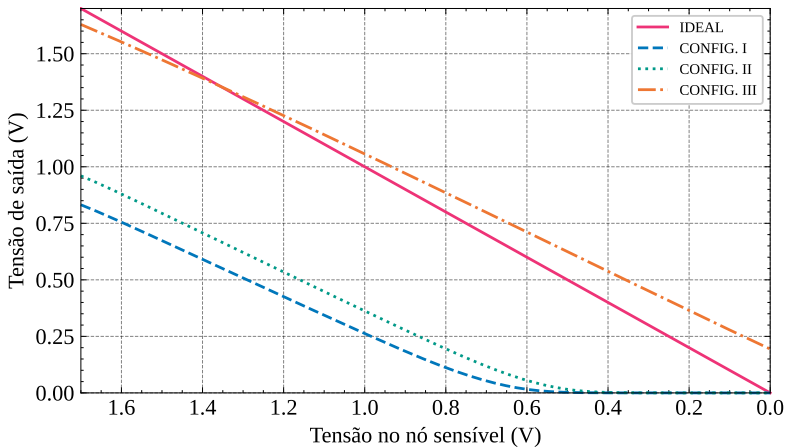
As tensões utilizadas para a fonte de alimentação V_{DD} , para o V_{RST} e V_{SEL} , assim como o maior valor de tensão V_{PIX} no nó sensível (obtido por simulação de ponto de operação, usando o NGSPICE e o modelo de fotodiodo do PDK) estão apresentadas na Tabela 2. Utilizou-se uma corrente $I_B = 2 \mu A$, para polarizar o transistor M_B , a 5v0_std, com $W = L = 1 \mu m$. A tensão de saturação de M_B , obtida por simulação, foi próxima de 152 mV.

Tabela 2: Níveis de tensão de cada configuração.

CONFIG.	V_{DD} (V)	V_{RST} (V)	V_{SEL} (V)	V_{PIX} (V)
I	1,8	1,8	1,8	1,7
II	1,8	1,8	1,8	1,7
III	1,8	1,8	3,3	1,7
IV	3,3	3,3	3,3	2,9
V	3,3	3,3	3,3	2,9
VI	3,3	3,3	5,0	2,9

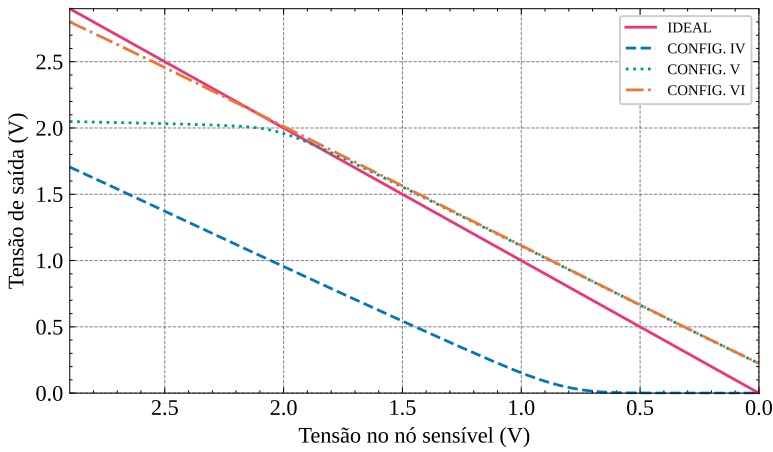
Fonte: Autores (2025).

Na Figura 4 são apresentados os resultados de simulação em corrente contínua (DC), via NGSPICE, das configurações I, II e III junto com reta para o caso ideal, quando o amplificador seguidor fonte, formado por M_{SF} , apresenta ganho unitário e a saída é linear. Já na Figura 5 é apresentado os resultados de simulação das configurações IV, V e VI juntamente com o caso ideal. Na simulação DC, o transistor M_{RST} foi substituído por uma fonte ideal de tensão, cujo valor de varredura foi de 0 à V_{PIX} , em que o V_{PIX} usado está indicado na Tabela 2. Nestes gráficos o eixo horizontal (Tensão no nó sensível) encontra-se propositalmente invertido de modo a mimetizar a descarga do fotodiodo durante o período de integração da fotocorrente.

Figura 4: Resultados da simulação DC para as configurações I, II e III.

Fonte: Autores (2025).

Figura 5: Resultados da simulação DC para as configurações IV, V e VI.



Fonte: Autores (2025).

Na Tabela 3 é apresentado os valores dos coeficientes de determinação R^2 (em %) entre V_{OUT} e V_{PIX} , obtido pelo método de mínimos quadrados, assim como os valores de $V_{OUT(max)}$, ΔV_{OUT} e ΔV_{GS} (ambos em V) e $\Delta V_{GS}/\Delta V_{OUT}$ (em V/V).

Tabela 3: Níveis de tensão de cada configuração.

CONFIG.	$V_{OUT(max)}$	ΔV_{OUT}	ΔV_{GS}	$\Delta V_{GS}/\Delta V_{OUT}$	R^2
I	0,832	0,765	0,192	0,250	99,958
II	0,960	0,891	0,168	0,188	99,970
III	1,629	1,435	0,254	0,177	99,983
IV	1,705	1,652	0,404	0,245	99,956
V	2,048	1,825	0,316	0,173	94,953
VI	2,800	2,576	0,317	0,123	99,998

Fonte: Autores (2025).

Nota-se que, ao utilizar os transistores 1v8_lvt na CONFIG. II há um aumento significativo da excursão da tensão de saída em relação ao uso dos transistores 1v8_std na CONFIG. I. Este aumento é ainda maior nas configurações que fazem uso do transistor 3v3_ntv como transistor de leitura, CONFIG. III, V e VI. O uso do transistor 5v0_std nas configurações IV, V e VI possibilita um aumento na excursão do sinal de saída devido ao aumento da tensão máxima V_{PIX} , uma vez que utiliza-se $V_{RST} = 3,3 V$ nestes caso.

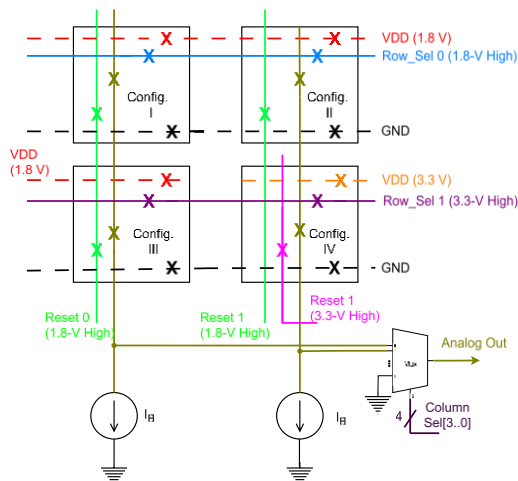
Além disso, as configurações que fazem uso do transistor nativo (CONFIG. III, V e VI) apresentam, em dado momento, um ganho maior do que 1 no transistor de leitura confirmando que o transistor 3v3_ntv não desliga completamente, contribuindo para a não linearidade destas configurações.

A matriz APS proposta

Dos seis arranjos de pixel descritos na seção anterior foram selecionadas quatro configurações que demonstram melhor desempenho, a saber as configurações I, II, III e IV, para a implementação do *layout*. Em (Oliveira; Teixeira; Santos, 2025) é descrito o projeto e simulação de uma matriz com 2x2 pixels de resolução, um pixel para cada uma das quatro configurações selecionadas.

Utilizou-se o Magic para a geração dos dispositivos e o KLayout para realizar o roteamento das trilhas de conexão. O diagrama de blocos da matriz 2x2 é apresentado na Figura 6, que inclui o multiplexador e as fontes de corrente I_B , as quais representam os transistores do circuito de espelho de corrente.

Figura 6: Diagrama de blocos da matriz de pixel 2x2 incluindo um multiplexador analógico 16:1.



Fonte: Autores (2025).

A escolha por utilizar um multiplexador (MUX) analógico de 16 linhas para 1 linha (16:1) justifica-se pelo projeto final visar uma matriz com 128x128 pixels de resolução, com cada pixel medindo $15\ \mu\text{m}/15\ \mu\text{m}$. Uma vez que cada coluna da matriz possui seu próprio barramento de saída, seriam necessárias 128 saídas analógicas. Contudo, a estrutura de conexão padrão (*padframe*) utilizada, denominada Caravel (Efabless, 2020), possui apenas 38 pinos de entrada/saída (I/O) de uso geral, dos quais apenas uma parte pode ser configurada para sinais analógicos. Com a utilização de um MUX 16:1, os 128 barramentos de saída são reduzidos para 8 saídas analógicas ($128/16 = 8$).

O *padframe* define a área de projeto e as conexões do circuito com o exterior do chip, incluindo os pinos de I/O, alimentação e os circuitos de proteção contra descargas eletrostáticas.

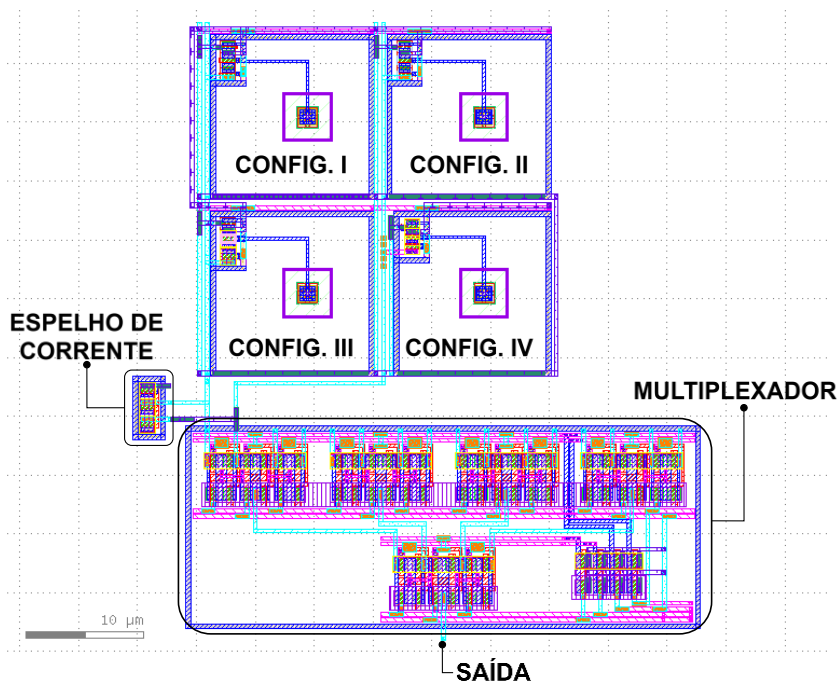
No Sky130, o Caravel, desenvolvido pela Efabless, permite que o projeto seja integrado e testado de forma padronizada em rodadas de fabricação compartilhadas (*Multi-Project Wafer* – MPW).

Na Figura 7 é apresentado o *layout* da matriz 2x2, juntamente com o MUX 16:1 e os transistores de polarização. O fotodiodo foi implementado como um quadrado de $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$, resultando em uma área total de $16\ \mu\text{m}^2$ e um perímetro de $16\ \mu\text{m}$.

O processo Sky130 dispõe de cinco camadas metálicas, como mostrado na Figura 2. A camada mais externa (Metal 5) foi utilizada para cobrir a área não fotossensível do pixel, não sendo exibida nas figuras para maior clareza. Para os barramentos de alimentação (V_{DD} e GND), priorizou-se o uso do Metal 3 e Metal 4, que possuem menor resistência de folha em comparação com o Metal 1 e Metal 2.

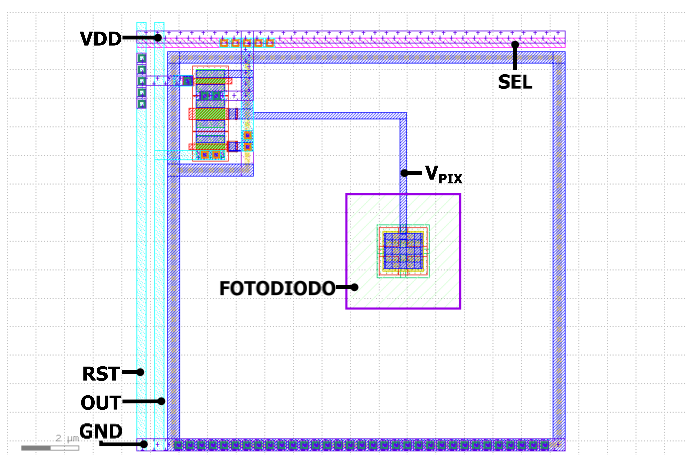
Na Figura 8 é mostrado, em detalhes, o *layout* do pixel da Configuração I. As demais configurações seguem uma estrutura semelhante.

Figura 7: *Layout* da matriz de pixel 2x2 incluindo um multiplexador 16:1 e transistores de polarização.



Fonte: Autores (2025).

Figura 8: *Layout* do pixel 3T-APS da CONFIG. I.



Fonte: Autores (2025)

Uma figura de mérito importante em sensores de imagem é o fator de preenchimento (*fill factor*), definido como a razão entre a área fotossensível e a área total do pixel. Cada pixel projetado neste trabalho possui dimensões de $15\ \mu\text{m}/15\ \mu\text{m}$ resultando em uma área total de $225\ \mu\text{m}^2$ por pixel. Na Tabela 4 é detalhado a área fotossensível e o fator de preenchimento correspondente para cada uma das quatro configurações implementadas.

Tabela 4: Níveis de tensão de cada configuração.

CONFIG.	Área Fotossensível (μm^2)	Fator de Preenchimento
I	158,016	70,23 %
II	158,016	70,23 %
III	156,186	69,42 %
IV	149,994	66,66 %

Fonte: Autores (2025).

Resultados de simulação

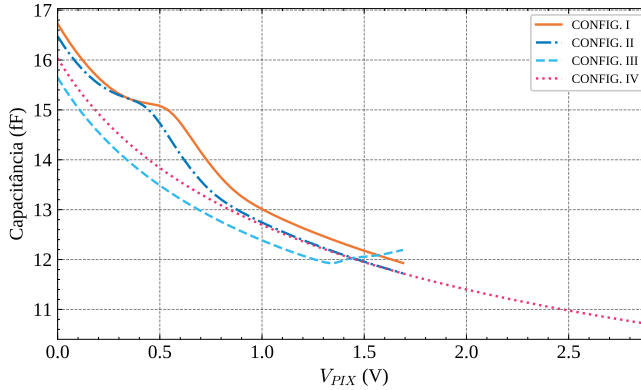
Após a extração do circuito da matriz 2×2 a partir do *layout*, foram realizadas duas análises utilizando NGSPICE: uma simulação em frequência (AC) para caracterizar a capacitância do nó fotossensível de cada pixel e uma simulação transiente (TRAN) para obter as formas de onda da tensão de saída do multiplexador e da tensão sobre o fotodiodo.

A capacitância do nó fotossensível é um parâmetro importante, pois está diretamente relacionado ao ganho de conversão do pixel, expresso como a variação da tensão de saída por elétron coletado (Stefanov, 2022, p. 22). Para extrair essa capacitância, injetou-se um sinal AC com frequência de $1\ \text{kHz}$ no nó V_{PIX} , medindo-se a corrente resultante que flui através da fonte de sinal. A capacitância é então calculada fazendo:

$$C = \frac{10^{\frac{I_{dB}}{20}} \cdot \text{sen}(\phi_I)}{2\pi \cdot f \cdot V_{AC}}$$

onde I_{dB} e ϕ_I são a magnitude (e dB) e a fase da corrente medida, respectivamente, f é a frequência do sinal AC e V_{AC} é a magnitude da fonte de sinal. O nível DC de V_{PIX} foi variado para analisar o comportamento da capacitância em função da polarização. Na Figura 9 são apresentadas as curvas das capacitâncias versus a tensão no nó sensível para as quatro configurações implementadas no *layout*, obtidas via simulação.

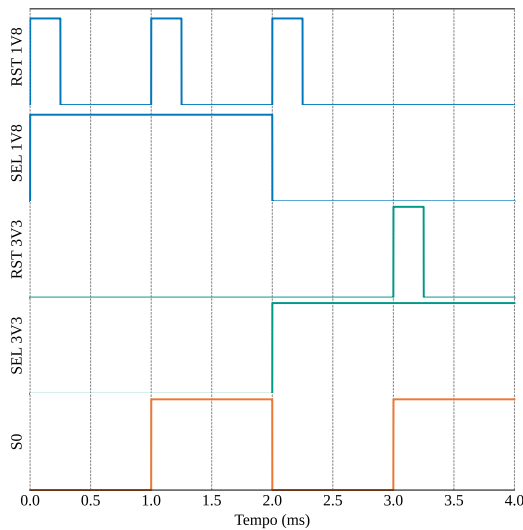
Figura 9: Capacitância no nó sensível para as quatro configurações.



Fonte: Autores (2025).

Para a análise transiente da matriz 2x2, a descarga do fotodiodo em cada pixel foi simulada por uma fonte de corrente de 30 pA constante conectada em paralelo ao mesmo, mimetizando o efeito de uma fotocorrente constante. O ciclo de leitura de cada pixel tem duração de 1 ms, sendo que o pixel é reinicializado nos primeiros 0,25 ms e a descarga (integração do sinal) ocorre nos 0,75 ms seguintes. Os sinais lógicos de comando utilizados na simulação são apresentados na Figura 10.

Figura 10: Níveis lógicos dos sinais de comando.



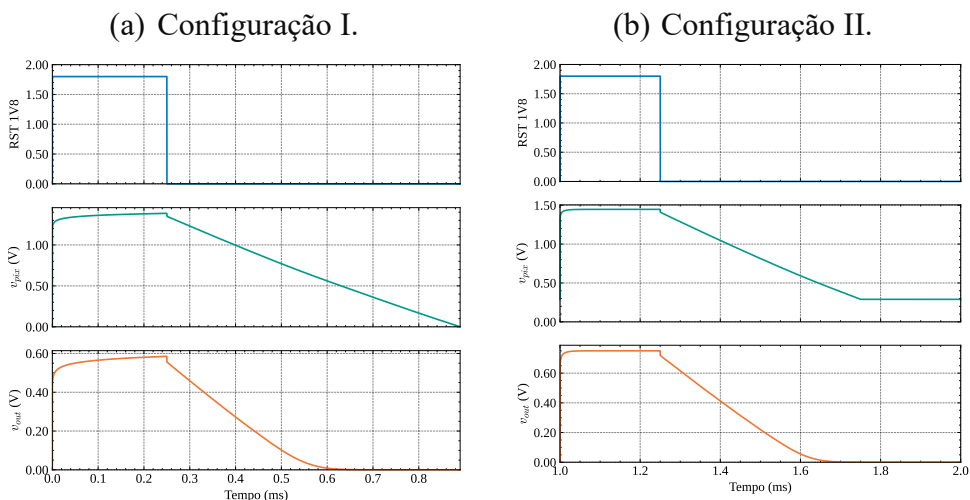
Fonte: Autores (2025).

A leitura dos pixels se deu de forma sequencial: primeiro a Configuração I, seguida pela configuração II, III e, por fim, a IV. Desta forma, o sinal de seleção da primeira linha (SEL 1V8, com nível alto de 1,8 V) permanece em nível alto durante a leitura das configurações I e II e em nível baixo nos dois ciclos seguintes. Em contrapartida, o sinal de seleção da segunda linha (SEL 3V3, com nível alto de 3,3 V) fica inativo nos dois primeiros ciclos e ativo durante a leitura das configurações III e IV.

O sinal S0, conectado ao bit menos significativo do multiplexador 16:1, seleciona a coluna a ser lida já que os outros bits do multiplexador são mantidos em nível baixo. Quando S0 está em nível baixo, seleciona a primeira coluna (configurações I e III), já quando está em nível alto, seleciona a segunda coluna (configurações II e IV). O sinal de reset com 1,8 V (RST 1V8) é aplicado às configurações I, II e III, enquanto o sinal com 3,3 V (RST 3V3) é aplicado à Configuração IV.

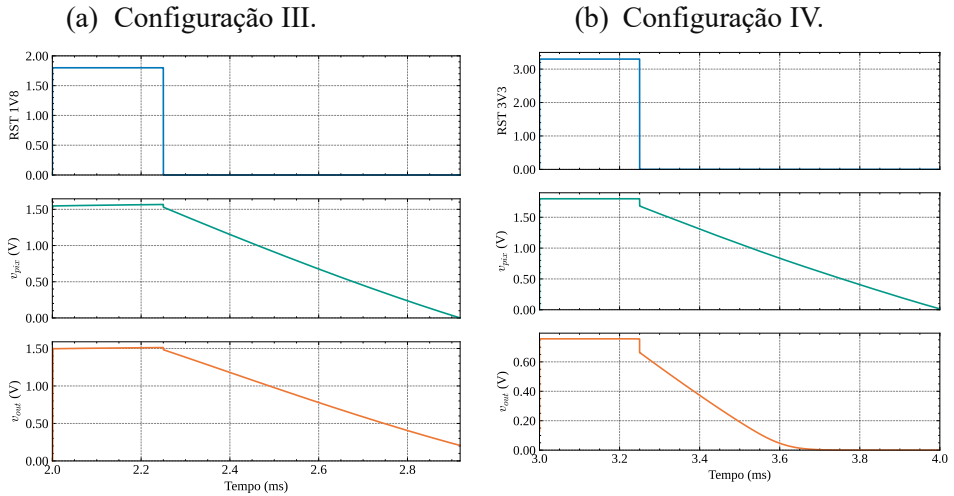
Na Figura 11 são apresentadas as formas de onda obtidas para as configurações I e II, em (a) e (b) respectivamente, mostrando a forma de onda do sinal de *reset* da tensão sobre o fotodiodo (v_{pix}) e da tensão de saída do multiplexador (v_{out}). De forma análoga, na Figura 12 são apresentados os mesmos sinais para as configurações III e IV, em (a) e (b) respectivamente.

Figura 11: Tensão de saída das configurações I e II.



Fonte: Autores (2025).

Figura 12: Tensão de saída das configurações III e IV.



Discussão

Considerando que este trabalho se encontra em fase avançada de desenvolvimento e que o chip final será uma matriz de 128x128 pixels, algumas discussões são pertinentes às estruturas e aos resultados de simulação apresentados nas seções anteriores.

Em relação aos tipos de pixels, investigou-se tanto configurações com tensão de alimentação de 1,8 V e de 3,3 V. A justificativa para a não adoção das configurações V e VI se deu pela redução da linearidade, especialmente para condições de baixa iluminação, no caso da configuração V. Já no caso da configuração VI, seria necessária uma tensão de seleção maior que a de alimentação, ou seja, uma tensão de 5,0 V em um circuito alimentado com 3,3 V, para que esse apresentasse uma resposta com elevada linearidade. De fato, se tal condição fosse adotada, a configuração VI seria a que apresentaria o maior coeficiente de determinação, de acordo com a Tabela 3. Mas o custo dessa configuração seria a necessidade de linhas de 5 V exclusivamente para acionar o transistor de seleção, o que não seria interessante do ponto de vista prático.

Adotou-se então as configurações I a IV, cada qual com uma excursão do sinal de saída e uma métrica relacionada à linearidade. Mas qual delas de fato seria a mais adequada à aplicação a uma matriz APS?

Tal resposta somente poderá ser dada de forma definitiva caso se avalie, experimentalmente, as faixas dinâmicas de cada configuração, ou seja, a relação entre o maior e o menor nível de iluminação que podem ser detectados pelo sensor. Isso é relacionado não apenas ao nível de excursão do sinal de saída, mas também ao patamar de ruído do sensor, que define o menor nível de iluminação que pode ser detectado. Além da faixa dinâmica e da linearidade, há outros parâmetros a serem avaliados de forma experimental, como o ganho de fotoconversão. Propõe-se, dessa forma, uma matriz de 128x128 pixels dividida em quatro setores, onde em cada setor se terá uma das quatro configurações adotadas, em um chip onde estarão presentes tensões de 1,8 V e 3,3 V. Dessa forma, em um momento futuro, os pixels poderão ser devidamente caracterizados oticamente.

Na Figura 7 mostrou-se uma matriz reduzida de 2x2 pixels, com as saídas conectadas a um MUX analógico 16:1, o que a princípio não seria necessário para uma matriz com apenas duas colunas (lembrando que cada entrada do multiplexador é a saída de uma coluna). Mas a adoção do MUX 16:1 se mostrou oportuna, porque assim pôde-se avaliar o efeito das capacitâncias parasitas dos transistores no sinal de saída, visando o uso de tal MUX no circuito final.

Para a avaliação da saída, propõe-se um *buffer* de saída analógico, capaz de conectar o sinal produzido nos pixels aos instrumentos e circuitos externos ao chip. Isso irá permitir a visualização integral do sinal na saída do pixel, como mostrado nas Figuras 11 e 12. Etapas de conversão analógica-digital *on-chip* são deixadas como trabalhos futuros.

Conclusão

Este trabalho mostrou o estudo e projeto de sensores de pixels ativos (APS) utilizando o PDK aberto Sky130 e ferramentas de código aberto, trabalho desenvolvido durante dois anos de projetos de Iniciação Científica na UFJF, em parceria com a Vinci Consulting. A contribuição do trabalho é de fato o uso de um PDK aberto para o projeto deste tipo de sensor. Além disso, se não for o primeiro, é um dos primeiros trabalhos publicados em língua portuguesa a respeito do uso de um PDK aberto.

Sendo o processo Sky130 manufaturável, é interessante que os pesquisadores, estudantes e quaisquer entusiastas da área possam, de alguma forma, ter acesso à fabricação dos chips. Iniciativas comerciais como o Tiny Tapeout (<https://tinytapeout.com/>) foram lançadas permitindo um custo reduzido de fabricação a universidades e usuários comuns (se comparado aos serviços de projeto multiusuário convencionais), com restrição de área, admitindo projetos desenvolvidos com os PDKs abertos. Eventualmente, iniciativas da IEEE Solid-State Circuits Society (SSCS) ou da IEEE Circuits and Systems Society (CASS) são lançadas, permitindo aos proponentes a fabricação gratuita. Nesse caso, os critérios de elegibilidade devem ser verificados nas chamadas específicas.

O processo de democratização do projeto de CIs é dinâmico, com iniciativas novas que surgem, enquanto outras se encerram ou se transformam. Para os próximos anos, se pensarmos de uma forma extrapolativa, é provável que mais iniciativas sejam lançadas, mais recursos computacionais disponibilizados e até mesmo o surgimento de novos PDKs abertos, além dos três citados neste trabalho. Espera-se, assim, que o projeto descrito neste capítulo possa ser um motivador para que novos projetos sejam desenvolvidos, incluindo o aperfeiçoamento na tecnologia de sensores de imagem.

Referências

Criteria & Assumptions — **SkyWater SKY130 PDK 0.0.0-369-g7198cf6 documentation**. Disponível em: <<https://skywater-pdk.readthedocs.io/en/main/rules/assumptions.html#process-stack-diagram>>. Acesso em: 19 out. 2025.

EFABLESS. **efabless/caravel_user_project_analog**. Disponível em: <https://github.com/efabless/caravel_user_project_analog>. Acesso em: 19 out. 2025.

FOSSUM, E. R. CMOS image sensors: electronic camera-on-a-chip. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 44, n. 10, p. 1689–1698, out. 1997.

FOSSUM, E. R. Digital camera system on a chip. **IEEE Micro**, v. 18, n. 3, p. 8–15, jun. 1998.

FREITAS, Luis Miguel C.; MORGADO-DIAS, F. A CMOS image sensor with 14-Bit column-parallel 3rd order incremental sigma-delta converters. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 313, p. 112162, 1 out. 2020.

FREITAS, Luis Miguel Carvalho; MORGADO-DIAS, Fernando. Thermal readout noise comparison of classical constant bias APS and switching bias APS used in CMOS image sensors. **Analog Integrated Circuits and Signal Processing**, v. 111, n. 2, p. 267–275, 1 maio 2022.

GAMAL, Abbas El; YANG, David X. D.; FOWLER, Boyd A. Pixel-level processing: why, what, and how? *In: SENSORS, CAMERAS, AND APPLICATIONS FOR DIGITAL PHOTOGRAPHY. Sensors, Cameras, and Applications for Digital Photography*. SPIE, 22 mar. 1999. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spice/3650/0000/Pixel-level-processing-why-what-and-how/10.1117/12.342849.full>>. Acesso em: 14 out. 2025

GILO, Hugo Dias; BRITO-FILHO, Francisco A. A 2.4 GHz Wireless Temperature Sensor designed in 130 nm CMOS technology with 0.07 °C precision from -100 °C to 200 °C. *In: 2023 7TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INSTRUMENTATION SYSTEMS, CIRCUITS AND TRANSDUCERS (INSCIT). 2023 7th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. ago. 2023. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10258501>>. Acesso em: 27 out. 2025

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS (IEEE). **IEEE Design and Test Magazine - Special Issue on Open Source EDA**. mar./abr. 2021.

JOHANNES KEPLER UNIVERSITY. **GitHub repository of the IIC-OSIC-TOOLS**., set. 2023. Disponível em: <<https://github.com/iic-jku/IIC-OSIC-TOOLS>>. Acesso em: 27 out. 2025

LIEBE, C. C. *et al.* Micro APS based star tracker. *In: , IEEE AEROSPACE CONFERENCE. Proceedings, IEEE Aerospace Conference*. mar. 2002. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1035396>>. Acesso em: 14 out. 2025

NUNES, Saulo Ávila. **Pixel para Halftoning no Plano Focal em Sensores de Imagem CMOS**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2012.

OLIVEIRA, Luís Karlos Mendes; TEIXEIRA, Estevao Coelho; SANTOS, Filipe Vinci. **Study of different 3T-APS Pixel Configurations Using the Open Sky130 Process Design Kit**. . MICROELECTRONICS STUDENTS FORUM 2024 (SFORUM'24). *Anais...*. Zenodo, , 8 jun. 2024. Disponível em: <<https://zenodo.org/records/14179213>>. Acesso em: 15 out. 2025

OLIVEIRA, Luís Karlos Mendes; TEIXEIRA, Estêvão Coelho; SANTOS, Filipe Vinci. **Design, layout and simulation of 3T-APS pixels using the Open Sky130 Process Design Kit**. . 25TH MICROELECTRONICS STUDENTS FORUM (SFORUM'25). *Anais...*. Zenodo, , 25 ago. 2025. Disponível em: <<https://zenodo.org/records/17113392>>. Acesso em: 15 out. 2025

OLIVEIRA, Wisla M. M.; BRITO-FILHO, Francisco A. Development of a Baseband Amplifier for a 130 nm CMOS process using open-source design flow. *In: 2022 6TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INSTRUMENTATION SYSTEMS, CIRCUITS AND TRANSDUCERS (INSCIT). 2022 6th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. ago. 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9913762>>. Acesso em: 14 out. 2025

PAJKANOVIC, A. Open Source CMOS General Purpose Operational Amplifier. *In*: 2021 IEEE 32ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROELECTRONICS (MIEL). **2021 IEEE 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL)**. set. 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9569148>>. Acesso em: 14 out. 2025

PATEL, Shivang; NAIK, Amisha. Design of Start-up Enabled Bandgap Voltage Reference. *In*: 2022 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVICES, CIRCUITS AND SYSTEMS (ICDCS). **2022 6th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)**. abr. 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9780858>>. Acesso em: 14 out. 2025

SKYWATER, Efabless. **Efabless Caravel “harness” SoC — Caravel Harness documentation**. Disponível em: <<https://caravel-harness.readthedocs.io/en/latest/>>. Acesso em: 14 out. 2025a.

SKYWATER, kyWater. **google/skywater-pdk: Open source process design kit for usage with SkyWater Technology Foundry’s 130nm node**. Disponível em: <<https://github.com/google/skywater-pdk>>. Acesso em: 14 out. 2025b.

SOUZA, Carolina Vieira; PEREIRA, Guilherme Ferrara Jorge; TEIXEIRA, Estêvão Coelho. **Design of Combinatorial APS Pixel Addressing Circuitry using the Sky130 Process Design Kit**. . MICROELECTRONICS STUDENTS FORUM 2024 (SFORUM 2024). **Anais...** . Zenodo, , 6 set. 2024. Disponível em: <<https://zenodo.org/records/14179361>>. Acesso em: 27 out. 2025

STEFANOV, Konstantin D. **CMOS Image Sensors**. [*S.l.*]: IOP Publishing, 2022.

TANG, Xifan *et al*. Taping out an FPGA in 24 hours with OpenFPGA: The SOFA Project. *In*: 2021 31ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON FIELD-PROGRAMMABLE LOGIC AND APPLICATIONS (FPL). **2021 31st International Conference on Field-Programmable Logic and Applications (FPL)**. ago. 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9556442>>. Acesso em: 14 out. 2025

TEIXEIRA, E. C.; SANTOS, F. V.; MESQUITA, A. C. High fill factor CMOS APS sensor with extended output range. **Electronics Letters**, v. 46, n. 25, p. 1658–1659, 9 dez. 2010.

TRAN, Duc-Manh *et al*. A Highly Digital VCO-based ADC for IoT Applications on Skywater 130nm. *In*: 2021 8TH NAFOSTED CONFERENCE ON INFORMATION AND COMPUTER SCIENCE (NICS). **2021 8th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)**. dez. 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9701515>>. Acesso em: 14 out. 2025

14- Estudo comparativo da degradação de tebutiuron através da fotocatalise heterogênea utilizando-se dióxido de titânio (TiO₂) e óxido de zinco (ZnO)

Thaís Fernandes Xavier⁴⁷

Samuel Rodrigues Castro⁴⁸

Jonathas Batista Gonçalves Silva⁴⁹

Júlio César José da Silva⁵⁰

Lilian Lúcia Rocha e Silva⁵¹

Introdução

A atividade humana e o desenvolvimento industrial tem introduzido pesticidas no meio ambiente. Contudo, as estações de tratamento de esgoto (ETEs) convencionais não degradam completamente esses pesticidas, que são lançados juntamente com efluentes em corpos d'água próximos, como rios e pequenos cursos d'água (Martin, 2009). O ingresso de pesticidas nas ETEs convencionais ocorre através da limpeza dos recipientes usados para armazenar esses pesticidas e equipamentos de aplicação, bem como das águas residuais da agricultura e de fábricas de pesticidas (Ballesteros, 2009). Estudos realizados em uma planta de processamento de pesticidas em uma zona industrial para se avaliar a concentração de pesticidas presentes em amostras de águas residuais brutas coletadas de uma bacia coletora nas instalações dessa planta de

⁴⁷ Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Juiz de Fora, engenheirathaisfernandes@gmail.com, ORCID 0000-0001-7489-747X

⁴⁸ Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Juiz de Fora, samuel.castro@ufjf.br, ORCID 0000-0003-4053-7040

⁴⁹ Doutor em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Juiz de Fora, jonathas.silva@ufjf.br, ORCID 0000-0001-5812-2623

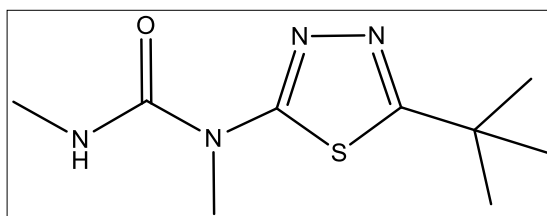
⁵⁰ Doutor em Ciências, Universidade Federal de Juiz de Fora, julio.silva@ufjf.br, ORCID 0000-0002-8708-1557

⁵¹ Doutora em Ciências, Universidade Federal de Juiz de Fora, lilian.silva@ufjf.br, ORCID 0000-0003-3331-2118

processamento de pesticidas, em intervalos de vários meses, constataram que as águas residuais dessa fábrica de processamento de pesticidas apresentavam concentrações de pesticidas na faixa de miligramas por litro (Rott, 2017). Outro estudo avaliando águas residuais, resultantes de uma indústria de pesticidas envolvida na formulação de pesticidas organoclorados e pesticidas organofosforados, antes e após o tratamento preliminar dessas águas residuais, mostrou concentrações de pesticidas organoclorados acima das permitidas pelo Conselho Central de Controle da Poluição local. No caso deste estudo, concentrações de pesticidas organoclorados na faixa de miligramas por litro (mgL^{-1}) também foram observadas (Chavan, 2016; Mahlalela, 2021). Em relação a outros países, o Brasil ficou em terceiro lugar (~221 toneladas por ano) entre os maiores consumidores de pesticidas do mundo entre os anos de 1990 e 2018. Recentemente, revelou-se que os herbicidas representam mais de 60% do consumo total de pesticidas no Brasil (Costa, 2021). Herbicidas são substâncias químicas amplamente utilizadas na agricultura para matar ou retardar o crescimento de ervas daninhas, deixando a cultura desejada relativamente intacta, aumentando, consequentemente, a produção agrícola. Porém, os herbicidas, devido à sua toxicidade, podem promover um impacto negativo ao meio ambiente contaminando o sistema aquático e os alimentos além de gerar problemas de saúde pública (Fonseca, 2015). O fato do Brasil ser um dos principais produtores de café, laranja, milho, cana-de-açúcar e soja do mundo implica no enorme consumo de pesticidas no país. As lavouras de cana-de-açúcar e de soja são seriamente afetadas por ervas daninhas necessitando da aplicação de um herbicida de amplo espectro como o tebutiuron (TBH), que pertence à classe das fenilureias (Costa, 2021). O TBH (Figura 1) apresenta baixa biodegradabilidade e devido à sua estabilidade química se decompõe lentamente no solo permanecendo tóxico por um longo período de tempo. Este herbicida tem uma meia-vida relatada de um ano em áreas que recebem de 1.000 a 1.500 mm de chuva por ano (Toit, 2012). Além disso, esse herbicida é altamente solúvel em água ($2,5 \text{ g L}^{-1}$), apresenta baixo coeficiente de absorção no solo ($\log K_{ow} = 1,79$), é extremamente persistente em corpos d'água, além de exibir alto grau de resistência a técnicas de degradação química e biológica e alta taxa de toxicidade à biota aquática (Costa, 2021; Prete, 2017). Devido à sua alta solubilidade em água, a EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos), classifica o TBH como substância química com grande potencial para contaminar águas subterrâneas (Fonseca, 2015). Mesmo com os riscos à saúde humana, as agências reguladoras em todo o mundo geralmente não incluem em suas respectivas legislações ambientais os herbicidas

atualmente em uso ou não mencionam a quantidade máxima permitida de um herbicida específico em amostras de água. Assim, o TBH não está incluído nas diretrizes do Ministério da Saúde (MS), da Organização Mundial da Saúde (OMS) e da Comissão Europeia (CE). Apenas a EPA reportou o nível máximo para o TBH em água de irrigação como $0,27 \mu\text{g L}^{-1}$ (Hamilton, 2003). A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) considera o TBH como uma substância química altamente tóxica (Souto, 2025). Desta forma, o uso disseminado deste herbicida para o controle de ervas daninhas e seu descarte excessivo no meio ambiente requerem a busca por mecanismos de degradação eficientes para o tratamento de águas residuais contendo TBH (Costa, 2021).

Figura 1: Fórmula estrutural do tebutiuron



Os chamados Processos de Oxidação Avançados (POAs) vem se tornando uma alternativa atraente para o tratamento de águas contaminadas por moléculas orgânicas (Paiu, 2025). Entre as vantagens do uso de POAs para o tratamento de efluentes líquidos está a possibilidade de sua aplicação à temperatura e pressão ambientes, com baixo consumo de reagentes e por serem processos ambientalmente amigáveis (Gautam, 2019; Velempini, 2021; Gonzaga, 2023). Estudos relatados na literatura investigaram a degradação de TBH utilizando oxidação eletroquímica com ânodos dimensionalmente estáveis (Montes, 2017), ânodos de diamante dopados com boro (Pereira, 2017), tecnologias baseadas em luz UVC (Gonçalves, 2023) e foto-Fenton solar (Silva, 2007). A fotocatalise heterogênea de TBH, protham e propachlor empregando dióxido de titânio (TiO_2) foi relatada na literatura e o autor constatou que o protham se degrada mais rapidamente do que o propachlor e o TBH (Muneer, 2005).

A fotocatalise heterogênea utilizando semicondutores é um método adequado para remover contaminantes orgânicos dissolvidos em meio aquoso. Essa estratégia utiliza uma fonte de luz com energia de fótons adequada que interage com estes semicondutores promovendo a degradação e mineralização destes contaminantes em água. Deve ser ressaltado que todo o processo ocorre sob condições de temperatura e pressão ambiente. A fotocatalise heterogênea é

um POA aplicado para degradar poluentes orgânicos persistentes com adequada efetividade. Nesse processo, quando um semicondutor absorve a energia de um fóton ($h\nu$) maior ou igual ao *gap* de energia da banda do semicondutor (E_g), um elétron (e^-) pode ser promovido da banda de valência (BV) para a banda de condução (BC), criando assim uma vacância de elétrons, ou seja, gerando um “buraco” (h^+) na banda de valência. O elétron e o buraco podem migrar para a superfície do semicondutor onde participam de reações redox com as espécies adsorvidas nessa superfície. Os buracos podem oxidar, tanto a H_2O quanto a hidroxila (OH^-) para gerar radicais hidroxila ($HO^\bullet$), enquanto os elétrons, ao reagirem com o oxigênio, podem reduzir o oxigênio molecular O_2 para $O_2^{\bullet-}$ (radicais superóxido) (Paiu, 2025). Os radicais $HO^\bullet$ gerados não são seletivos a alvos moleculares específicos e apresentam alta velocidade de reação destruindo os contaminantes orgânicos pela quebra de suas moléculas e transformando-os, assim, em produtos relativamente menos tóxicos, CO_2 , H_2O e sais inorgânicos (Oliveira, 2022; Rani, 2022, França, 2025). Os semicondutores mais utilizados na fotocatalise heterogênea são o dióxido de titânio (TiO_2) e o óxido de zinco (ZnO) devido à sua alta estabilidade, não toxicidade, resistência à corrosão, insolubilidade em água e custo-benefício. Esses óxidos funcionam com mecanismo semelhante nos processos de degradação de contaminantes orgânicos, também denominados contaminantes emergentes (Ghosh, 2019). ZnO é geralmente instável em soluções aquosas iluminadas por radiação ultravioleta (UV), especialmente em meios fortemente ácidos devido ao processo de fotocorrosão, diminuindo sua atividade fotocatalítica em solução aquosa (Abebe, 2020).

Dessa forma, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de determinar a atividade fotocatalítica de TiO_2 frente ao ZnO , associados à luz UVC, na degradação do herbicida TBH comercial em meio aquoso, utilizando-se fotocatalise heterogênea, sob condições otimizadas de reação. A degradação de TBH foi monitorada por espectrofotometria de absorção molecular na região do ultravioleta-visível (UV-Vis). O efeito da alteração de pH do meio reacional, das concentrações de TiO_2 e de ZnO e das concentrações de TBH empregadas em água deionizada sobre os processos de degradação realizados foram avaliados. Assim, a potencialidade de utilização do ZnO foi avaliada frente aos processos de degradação onde TiO_2 é utilizado para a degradação do contaminante orgânico avaliado nas condições experimentais adotadas neste trabalho. Os estudos foram realizados utilizando-se um reator com configuração simples contendo uma fonte de luz UVC (254,0 nm) em seu interior.

Reagentes empregados

Os reagentes utilizados neste trabalho foram tebutiuron (TBH) – Combine 500 SC[®] (Dow AgroSciences Southern Pty), óxido de zinco (99,0 %, Sigma-Aldrich), dióxido de titânio 100% anatásio (99,8%, Sigma-Aldrich), persulfato de potássio ($\geq 99,0\%$, Sigma-Aldrich), ácido sulfúrico (98,0%, Impex), hidróxido de sódio (99,0%, Impex). Todos os reagentes foram utilizados sem etapa de purificação prévia.

Métodos

Todos os experimentos foram realizados em béqueres abertos. Primeiramente, preparou-se uma solução estoque em água deionizada de TBH comercial (Combine 500 SC[®]) contendo uma concentração de TBH de $100,0 \text{ mg L}^{-1}$. As soluções diluídas contendo TBH foram preparadas em água deionizada a partir da diluição da solução estoque em balão volumétrico de 100,00 mL nas concentrações desejadas ($5,0$; $10,0$ e $15,0 \text{ mg L}^{-1}$) e transferidas para um béquer de 250,00 mL. Essas soluções diluídas em água deionizada foram submetidas aos processos de degradação propostos (sistemas TiO_2/UV e ZnO/UV). Os processos de degradação realizados foram avaliados em três valores de pH ($3,0$; $6,0$ e $8,0$), em três concentrações de TBH ($5,0$; $10,0$ e 15 mg L^{-1}) e em três concentrações dos fotocatalisadores TiO_2 e ZnO ($0,5$; $1,0$ e $2,0 \text{ g L}^{-1}$) no meio reacional. Os experimentos foram realizados no interior de um reator fotocatalítico de dimensões $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$, revestido internamente com folhas de papel alumínio. No interior desse reator fotoquímico as soluções contendo TBH foram irradiadas através de uma lâmpada monocromática de luz UVC ($254,0 \text{ nm}$, 15 W , Philips TUV G5T8) centralizada na parte superior do reator. Dentro do reator, para garantir a homogeneidade da solução de estudo, manteve-se a solução submetida ao processo de degradação sob agitação constante e em contato com a luz UVC. Em intervalos de tempo estabelecidos, alíquotas da reação foram retiradas e submetidas à centrifugação por 10,0 minutos (Daiki, 80-2B) com rotação de 1.800 rpm para o sistema ZnO/UV e 2.200 rpm para o sistema TiO_2/UV para decantação do fotocatalisador remanescente. Após o processo de centrifugação das alíquotas retiradas do meio reacional, o sobrenadante foi retirado e submetido à análise em espectrofotômetro de absorção molecular na região do ultravioleta-visível (UV-Vis). O monitoramento dos processos de degradação estudados foi realizado utilizando-se um espectrofotômetro de duplo feixe

Shimadzu modelo UV-1800, em cubetas de quartzo de 1,0 cm de caminho óptico, no intervalo de comprimento de onda de 190 a 600 nm, a fim de se avaliar as condições experimentais que ocasionariam uma maior degradação de TBH comercial em água deionizada. A absorbância máxima da banda característica do contaminante orgânico foi monitorada em 254 nm. Todos os experimentos foram conduzidos em temperatura ambiente. Para o ajuste do pH das soluções a serem submetidas aos processos de degradação foram utilizadas soluções de H_2SO_4 0,1000 mol L^{-1} e de NaOH 0,0100 mol L^{-1} utilizando-se um pHmetro (Mettler Toledo, modelo Five Easy). Para o preparo das soluções diluídas utilizadas nesse trabalho foi empregada água deionizada a 18,2 M Ω (Elga Veolia Purelab Option-Q, Reino Unido).

Resultados e discussão

A eficiência da fotocatalise heterogênea é influenciada pela natureza do fotocatalisador, o comprimento de onda e a intensidade da radiação incidente, a concentração dos contaminantes, o pH da solução e a presença de outros compostos orgânicos e outros íons (França, 2025). Desta forma, o efeito da alteração de pH do meio reacional, das concentrações de TBH empregadas e das concentrações de TiO_2 e de ZnO em água deionizada sobre os processos de degradação realizados foram avaliados para se determinar as condições experimentais que levariam a uma maior degradação de TBH.

Estudo do pH nos processos de degradação realizados

Parâmetros importantes da reação devem ser controlados para se atingir a melhor atividade fotocatalítica na degradação de um contaminante orgânico. Um dos parâmetros que deve ser avaliados é o pH da solução aquosa nos procedimentos de degradação realizados, uma vez que esse é o parâmetro que mais influencia a degradação de um contaminante orgânico quando a fotocatalise heterogênea é empregada. O pH da solução influencia a geração de espécies reativas na superfície do fotocatalisador e influencia a atração-repulsão do contaminante orgânico na superfície do mesmo, o primeiro e principal estágio dos processos de degradação fotocatalítica (Akerdi, 2019; Rajamanickam, 2016).

Desta forma, para avaliar o efeito do pH sobre a degradação de TBH, fixou-se a concentração dos fotocatalisadores (1,0 g L^{-1}) e a concentração da solução contendo o contaminante orgânico (5,0 mg L^{-1}) e variou-se o pH da

solução (pH=3,0; 6,0; 8,0). A Tabela 1 resume os dados obtidos ao final de 60 minutos de reação nos diferentes valores de pH empregados durante os processos de degradação avaliados quando os sistemas TiO₂/UV e de ZnO/UV foram utilizados empregando-se uma concentração fixa de TBH e dos fotocatalisadores, com descrito anteriormente.

O pH do ponto de carga zero (pH_{pzc}) do fotocatalisador (pH no qual a superfície do fotocatalisador tem uma carga neutra líquida) pode ser útil para se avaliar o pH ideal para realizar a reação de degradação de um contaminante empregando-se fotocatalise heterogênea (Jaafara, 2016).

Tabela 1 - Degradação de TBH em diferentes valores de pH durante os processos de degradação avaliados em água deionizada

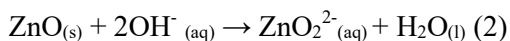
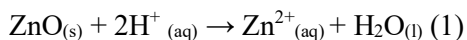
Óxido	pH	Degradação de TBH (%)
TiO ₂	3,0	48,3
	6,0	4,5
	8,0	3,8
ZnO	3,0	23,9
	6,0	31,9
	8,0	35,3

Fonte: Autoria própria (2025)

O pH_{pzc} de ZnO e TiO₂ (anatásio) foi relatado como 9,0 e 6,0, respectivamente (Cataño, 2012; Kosmulski, 2002). Isso significa que, para valores de pH acima do pH_{pzc}, a superfície desses fotocatalisadores é carregada negativamente e, para valores de pH menores do que o pH_{pzc}, é carregada positivamente. Assim, o pH afeta a eficiência da reação fotocatalítica devido a possíveis interações eletrostáticas entre o fotocatalisador e o contaminante na solução. Além disso, em pH básico, devido à alta concentração de íons hidroxila, pode ocorrer uma maior formação de radicais hidroxila, responsáveis pela degradação do poluente (Cataño, 2012; Reis, 2022).

Analisando a Tabela 1, é possível observar como o aumento progressivo do pH durante os experimentos realizados afeta de forma diferenciada a degradação do TBH empregando-se TiO₂ e ZnO como fotocatalisadores. Dessa forma, quando o TiO₂ é utilizado, é possível observar uma diminuição na degradação de TBH à medida que o pH da solução aumenta. Desta forma, uma maior degradação de TBH foi observada em pH=3,0 (48,3 %

de degradação) e uma menor degradação desse contaminante orgânico foi observado em pH=8,0 (3,8 % de degradação). Por outro lado, quando o ZnO é utilizado como fotocatalisador, há um ligeiro aumento na degradação de TBH com o aumento do pH da solução. Assim, uma menor degradação de TBH foi observada em pH=3,0 (23,9 % de degradação) e uma maior degradação desse contaminante orgânico foi observado em pH=8,0 (35,3 % de degradação). Uma maior degradação de TBH em pH=3,0 após 60 minutos de reação, quando o sistema TiO₂/UV foi empregado, é justificada pelo fato que o dióxido de titânio tem maior atividade oxidante em menores valores de pH, mas o excesso de H⁺ pode diminuir a taxa de reação. Em meio ácido, o dióxido de titânio se comporta como um ácido de Lewis forte devido à carga positiva em sua superfície. Como o TBH está em sua forma aniônica (pK_a = 1,20) em pH = 3,0, ele atua como uma base de Lewis forte e se adsorve na superfície do fotocatalisador carregada positivamente por meio de um processo de complexação (Kumar, 2017). Em pH=6,0, a superfície do fotocatalisador apresenta carga neutra, ou seja, o fotocatalisador encontra-se em seu ponto de carga zero, e, desta forma, não ocorre adsorção eficiente da molécula de TBH carregada negativamente na superfície do fotocatalisador o que acarreta apenas uma pequena degradação do contaminante orgânico. Em meio alcalino, o fotocatalisador tem sua superfície carregada negativamente e o processo de complexação provavelmente não é favorecido devido à adsorção competitiva dos grupos hidroxila e da molécula de TBH, bem como à repulsão coulômbica entre o fotocatalisador carregado negativamente e a molécula de TBH (Kumar, 2017). Uma maior degradação de TBH em pH=8,0 após 60 minutos de reação, quando o sistema ZnO/UV foi empregado, é justificada pelo fato da ocorrência da aglomeração de partículas de ZnO em baixos valores de pH reduzindo a adsorção de contaminantes na superfície do fotocatalisador, bem como a absorção de fótons. Dessa forma, o aumento da eficiência do fotocatalisador em pH alcalino pode ser explicado pelo aumento na formação de radicais hidroxila com o aumento do pH (Rajamanickam, 2016). Além disso, em meio fortemente ácido ou fortemente básico, a eficiência de decomposição de contaminantes emergentes pode ser reduzida, especialmente em ambientes ácidos, o que pode ser explicado como segue: (i) ZnO é um óxido anfotérico. Ele pode se dissolver parcialmente em condições altamente ácidas (pH = 4,0) e alcalinas (pH = 12,0), o que leva à diminuição da eficiência de degradação (Yang, 2016; Jagannatha, 2017; Miao, 2014; Velmurugan, 2011). A dissolução de ZnO em ambos os meios pode ser expressa de acordo com as equações 1 e 2 a seguir:



A presença de grandes quantidades de íons OH^{-} nas superfícies das partículas, bem como no meio de reação favorece a formação de radicais $\text{OH}^{\bullet}$, então a eficiência de degradação aumenta. No entanto, com aumento adicional no pH, o ZnO se dissolve de acordo com a reação (2), resultando na redução da eficiência de degradação (Yang, 2016; Jagannatha, 2017; Wang, 2007; Mai, 2018)

Estudo da variação da concentração de TBH

Para o estudo do efeito da concentração de TBH sobre os processos de degradação estudados, foram fixados a concentração dos fotocatalisadores ($1,0 \text{ g L}^{-1}$) e o melhor pH de degradação obtido utilizando os sistemas TiO_2/UV ($\text{pH}=3,0$) e ZnO/UV ($\text{pH}=8,0$) e variou-se a concentração da solução contendo TBH (5,0; 10,0 e 15 mg L^{-1}). A Tabela 2 resume a degradação de TBH, após 60 minutos de reação, nos diferentes valores de concentração de TBH empregados durante os processos de degradação realizados.

A eficiência da degradação de um contaminante depende da adsorção desses contaminantes na superfície do fotocatalisador. A concentração inicial do contaminante é um fator importante que não pode ser ignorado em uma reação fotocatalítica. Geralmente, a porcentagem de degradação diminui com o aumento da concentração do poluente, mantendo-se uma quantidade fixa de fotocatalisador (Kumar, 2017). Dessa forma, à medida que a concentração do contaminante aumenta, mais substâncias orgânicas são adsorvidas na superfície do fotocatalisador. Esse fato torna um número menor de fótons disponíveis para atingir a superfície do fotocatalisador e, portanto, menos radicais hidroxila são formados, resultando em uma menor porcentagem de degradação do contaminante (Rajamanickam, 2016; Kumar, 2017). Além disso, em altas concentrações dos contaminantes orgânicos pode-se gerar produtos intermediários que podem adsorver na superfície do fotocatalisador, influenciando negativamente na degradação, e também devido a maior concentração do contaminante ocupar e/ou bloquear os sítios ativos da superfície do fotocatalisador, diminuindo a taxa de degradação (Muneer, 2005).

Tabela 2 - Degradação de TBH empregando-se diferentes valores de concentração desse contaminante orgânico durante seu processo de degradação em água deionizada

Óxido	Concentração de TBH (mg/L)	Degradação de TBH (%)
TiO ₂	5,0	48,3
	10,0	18,3
	15,0	18,5
ZnO	5,0	35,3
	10,0	16,5
	15,0	9,0

Fonte: Autoria própria (2025)

Para ambos os fotocatalisadores avaliados, uma maior degradação de TBH ocorreu quando sua concentração no meio reacional foi de 5,0 mgL⁻¹, mostrando que o aumento de sua concentração não favoreceu sua degradação mantendo-se uma concentração fixa de TiO₂ e ZnO.

Estudo da Concentração dos fotocatalisadores

O efeito da influência da concentração de TiO₂ e ZnO sobre os processos de degradação avaliados foi investigado fixando o melhor pH de degradação obtido utilizando os sistemas TiO₂/UV (pH=3,0) e ZnO/UV (pH=8,0), a concentração ótima para a degradação de TBH (5 mg L⁻¹) e variou-se a concentração dos fotocatalisadores utilizados (0,5, 1,0 e 2,0 g L⁻¹) em solução aquosa. A Tabela 3 resume a degradação de TBH nos diferentes valores de concentração dos fotocatalisadores empregados durante os processos de degradação após 60 minutos de reação. De acordo com os dados obtidos, a degradação de TBH foi favorecida com o aumento da concentração de TiO₂ e de ZnO até um certo limite (1,0 g L⁻¹) e depois, houve uma tendência de perda de eficiência de degradação com o aumento adicional da concentração dos fotocatalisadores.

Um dos principais parâmetros a serem avaliados em estudos de degradação de contaminantes é a quantidade de fotocatalisador a ser utilizada durante os processos de degradação para evitar seu uso excessivo. Assim, é necessário descobrir a carga ideal de fotocatalisador para a remoção eficiente

do contaminante (Rajamanickam, 2016). O aumento da concentração do fotocatalisador leva a um aumento no número de sítios ativos na superfície do fotocatalisador, resultando em um aumento no número de radicais hidroxila formados, o que, consequentemente, pode causar maior degradação do poluente. No entanto, uma determinada concentração limite de fotocatalisador pode causar maior turbidez no meio reacional, o que bloquearia a radiação UV, levando à redução dos processos de degradação do poluente (Kumar, 2017).

Tabela 3 - Degradação de TBH em diferentes concentrações dos fotocatalisadores empregados durante os processos de degradação

Óxido	Concentração de fotocatalisador (g L⁻¹)	Degradação de TBH (%)
TiO ₂	0,5	20,6
	1,0	48,3
	2,0	45,7
ZnO	0,5	24,7
	1,0	35,3
	2,0	27,1

Fonte: Autoria própria (2025)

Estudo da adição de oxidante auxiliar (PS)

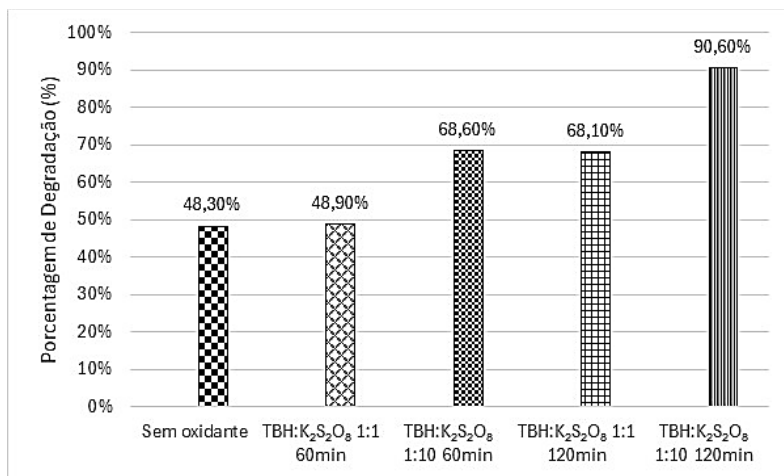
Os estudos realizados neste trabalho de degradação de TBH relatam, mesmo nas condições otimizadas de reação, que a degradação de TBH não foi efetiva empregando-se os sistemas TiO₂/UV e ZnO/UV em água deionizada. Tal fato pode ser justificado devido à robustez estrutural do contaminante orgânico avaliado. Além disso, o TBH é considerado estável mesmo quando exposto à luz (Van Dam, 2004). Como relatado na literatura, TBH possui grupos abandonadores muito estáveis que não propiciam que sua degradação seja iniciada tão facilmente, e, portanto, esse contaminante orgânico é mais resistente à clivagem durante o processo de fotocátalise (Mahlalela, 2021).

Uma das principais desvantagens dos processos de fotocátalise heterogênea é a rápida recombinação dos elétrons fotogerados (*e*⁻) e dos buracos (*h*⁺). Isto pode ser minimizado substancialmente com o uso de aceitadores de elétrons ao sistema. Assim, a adição de aceitadores de elétrons ao meio de reação, como persulfato de potássio (K₂S₂O₈), pode aumentar a taxa de

degradação de contaminantes orgânicos evitando a recombinação elétron-buraco ao aceitar os elétrons da banda de condução e aumentando a concentração de radicais hidroxila no meio (Muneer, 2005). Para minimizar essa recombinação de pares elétron-buraco no meio reacional, o oxidante auxiliar persulfato de potássio (PS), um aceitador de elétrons, foi adicionado às suspensões aquosas contendo TiO_2 e ZnO , nas melhores condições de reação, durante os processos de degradação de TBH. Os experimentos empregando o agente oxidante auxiliar foram avaliados utilizando-se diferentes razões molares de TBH: $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ao meio reacional após 60 e 120 minutos de reação de modo a se verificar também como o tempo reacional afetava os processos de degradação propostos.

A Figura 2 nos mostra como a adição de PS afetou a degradação do contaminante orgânico estudado utilizando-se o sistema TiO_2/UV no processo de degradação de TBH. A Tabela 3 mostra uma degradação de TBH em água deionizada de 48,30% sem a adição de PS, empregando-se o sistema TiO_2/UV , nas melhores condições de degradação. Podemos observar na Figura 2 que a degradação de TBH, quando a proporção TBH: $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 1:1 foi avaliada nos processos de degradação, que a degradação de TBH praticamente não se alterou em relação ao processo de degradação na ausência de PS (48,90% de degradação) após 60 minutos de reação. Adicionalmente, foi verificada uma degradação adicional de TBH após 120 minutos de reação (68,10% de degradação) empregando-se a proporção TBH: $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 1:1 no meio reacional. Porém, uma degradação um pouco mais expressiva de TBH foi obtida quando a proporção TBH: $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 1:10 foi considerada no processo de degradação de TBH após 60 minutos de reação (68,60% de degradação) em relação ao processo de degradação na ausência de PS. Por outro lado, uma degradação expressiva (90,6% de degradação) de TBH foi observada após 120 minutos quando a proporção TBH: $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 1:10 foi utilizada.

Figura 2 – Comparação da porcentagem de degradação de TBH sem adição de PS, empregando-se diferentes razões molares de TBH:K₂S₂O₈ e em diferentes tempos de reação empregando-se o sistema TiO₂/UV em água deionizada nas condições ótimas de degradação ([TiO₂] = 1,0 g L⁻¹, pH=3,0 e [TBH] = 5,0 mg L⁻¹)

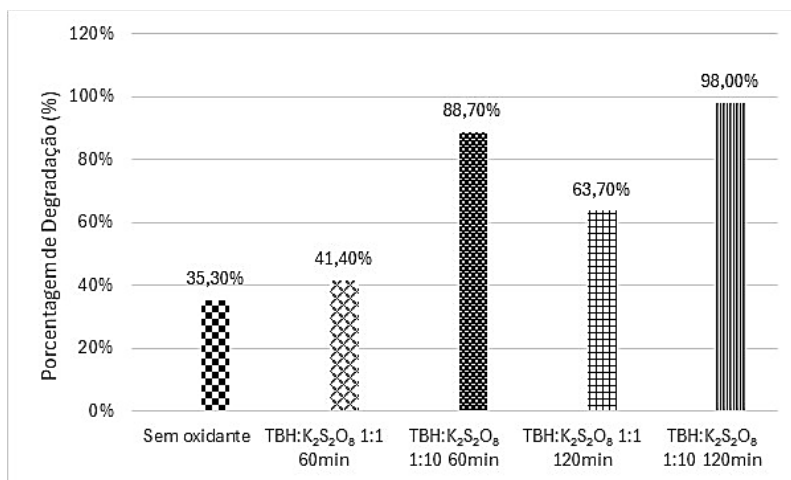


Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 3 nos mostra como a adição de PS afeta a degradação de TBH utilizando-se o sistema ZnO/UV. Podemos observar também na Tabela 3 uma degradação de TBH em água deionizada de 35,30% sem a adição de PS, empregando-se o sistema ZnO/UV, nas melhores condições de degradação. De acordo com a Figura 3 é possível observar, assim como no caso do sistema TiO₂/UV (Figura 2), que o uso da razão molar TBH:K₂S₂O₈ 1:1 não levou a um aumento significativo da degradação de TBH em relação ao processo de degradação na ausência de PS (41,40% de degradação) após 60 minutos de reação. Adicionalmente, foi verificada uma degradação de TBH após 120 minutos de reação (63,70% de degradação) empregando-se a razão molar TBH:K₂S₂O₈ 1:1. Novamente, foi observado um comportamento similar ao observado quando o sistema TiO₂/UV foi empregado na degradação de TBH, resguardando as diferentes porcentagens de degradação de TBH observadas na Figura 2 empregando-se uma proporção TBH:K₂S₂O₈ 1:1 nos processos de degradação. Os dados obtidos revelam também que ocorreu uma degradação mais acentuada de TBH quando a razão molar TBH:K₂S₂O₈ 1:10 foi considerada no processo de degradação de TBH após 60 minutos de reação (88,70 % de degradação), quando o sistema ZnO/UV foi empregado nos

processos de degradação.

Figura 3 – Comparação da porcentagem de degradação de TBH sem adição de PS, empregando-se diferentes razões molares de TBH:K₂S₂O₈ e em diferentes tempos de reação empregando-se o sistema ZnO/UV em água deionizada nas condições ótimas de degradação ([ZnO]=1,0 gL⁻¹, pH=8,0 e [TBH] = 5,0 mg L⁻¹)



Fonte: Autoria própria (2025)

Uma degradação mais expressiva de TBH foi observada quando a razão molar TBH:K₂S₂O₈ 1:10 foi utilizada no processo de degradação após 120 minutos de reação (98,00 % de degradação). Desta forma, a adição de PS teve uma ação mais efetiva na degradação de TBH quando a razão molar TBH:K₂S₂O₈ 1:10 foi utilizada no processo de degradação utilizando o sistema ZnO/UV. Assim, a adição de PS ao sistema ZnO/UV atuou de forma mais eficaz na redução da recombinação elétron-buraco na superfície do fotocatalisador, resultando, assim, em uma maior degradação de TBH.

Conclusão

Os estudos de degradação de TBH comercial realizados, utilizando os sistemas TiO₂/UV e ZnO/UV, possibilitaram determinar as condições experimentais ajustadas para a degradação desse contaminante orgânico em solução aquosa. Assim, ao final de 60 minutos de reação, para o sistema TiO₂/UV, a melhor condição de degradação de TBH ocorreu em pH=3,0,

concentração de TBH de 5,0 mg L⁻¹ e concentração de TiO₂ de 1,0 g L⁻¹. Já para o sistema ZnO/UV, a melhor condição de degradação ocorreu em pH= 8,0, concentração de TBH de 5,0 mg L⁻¹ e concentração de ZnO de 1,0 g L⁻¹ ao final de 60 minutos de reação.

Nas condições mais ajustadas de reação observou-se uma degradação de 48,3% de TBH quando o sistema TiO₂/UV foi empregado na degradação de TBH e uma degradação de 35,3% de TBH quando o sistema ZnO/UV foi empregado nos processos de degradação avaliados após 60 minutos de reação. Esse comportamento pode ser atribuído à robustez estrutural do contaminante orgânico avaliado que possui grupos abandonadores muito estáveis em sua estrutura que não propiciam seu processo de degradação.

Quando um agente oxidante auxiliar (PS) foi adicionado ao meio reacional contendo as suspensões de TiO₂ e ZnO observou-se um aumento significativo na degradação de TBH quando uma razão molar TBH:K₂S₂O₈ 1:10 em um tempo de 120 minutos de reação, principalmente quando o sistema ZnO/UV foi empregado na degradação de TBH, onde, aparentemente, a recombinação elétron-buraco na superfície do fotocatalisador mostrou-se menos afetiva resultando a uma maior degradação do contaminante orgânico avaliado.

Referências

- Abebe, B., Murthy, H. C. A., & Amare, E. (2020). Enhancing the photocatalytic efficiency of ZnO: Defects, heterojunction, and optimization. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, Amsterdã: Elsevier, v. 10, 10336.
- Akerdi, A. G., & Bahrami, S. H. (2019). Application of heterogeneous nano-semiconductors for photocatalytic advanced oxidation of organic compounds: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdã: Elsevier, v. 7, n. 5, 103283.
- Ballesteros, M. M. M., Sanchez, J. A. P., Casas, J. L. L., Oller, I., & Malato, S. R. (2009). Degradation of a four-pesticide mixture by combined photo-Fenton and biological oxidation. **Water Res**, v. 43, n. 3, pp. 653–660.
- Cataño, F. A., Valencia, S. H., Hincapié, E. A., Restrepo, G. M., & Marín, J. M. (2012). A comparative study between TiO₂ and ZnO photocatalysis: photocatalytic degradation of cibacron yellow FN-2R dye. **Latin American Applied Research**, v. 42, pp. 33-38.
- Chavan, D. M., Thacker, D. N. P., & Tarar, D. J. L. (2016). Toxicity evaluation of pesticide industry wastewater through fish bioassay. **IRA Int. J. Appl. Sci.**, v. 3, n. 3, pp. 331–339.

Costa, A. J. M., Kronka, M. S., Cordeiro-Junior, P. J. M., Fortunato, G. V., Santos, A. J., & Lanza, M. R. V. (2021). Treatment of Tebuthiuron in synthetic and real wastewater using electrochemical flow-by reactor. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 882, 114978.

França, Y. K. S., Pereira, K. S., Feitosa, Y. H. C., Marques, V. B., & Souza, D. R. (2025). Titanium Dioxide (TiO₂) and Photocatalysis: A Detailed Overview of the Synthesis, Applications, Challenges, Advances and Prospects for Sustainable Development. **Orbital: Electron. J. Chem.**, v.17, n. 4, pp. 355-381.

Fonseca, R. J., Segatelli, M. G., Borges, K. B., & Tarley, C. R. T. (2015). Synthesis and evaluation of different adsorbents based on poly(methacrylic acid-trimethylolpropane trimethacrylate) and poly(vinylimidazole-trimethylolpropane trimethacrylate) for the adsorption of tebuthiuron from aqueous medium. **Reactive and Functional Polymers**, v. 93, pp. 1–9.

Gautam, P., Kumar, S., & Lokhandwala, S. (2019). Advanced oxidation processes for treatment of leachate from hazardous waste landfill: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã: Elsevier, v. 237, 117639.

Ghosh, M., Manoli, K., Shen, X., Wang, J., & Ray, A. K. (2019). Solar photocatalytic degradation of caffeine with titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, Amsterdã: Elsevier, v. 377, pp. 1–7.

Gonçalves, B. R., Della-Flora, A., Sirtori C., Sousa, R. M. F., Starling, M. C. V. M., Perez, J. A. S., Saggiaro, E. M., Junior, S. F. S., & Trovó, A. G. (2023). Influence of water matrix components and peroxide sources on the transformation products and toxicity of tebuthiuron under UVC-based advanced oxidation processes. **Sci. Total Environ.**, v. 859, 160120.

Gonzaga, I. M. D., Almeida, C. V. S., & Mascaro, L. H. (2023). A Critical Review of Photo-Based Advanced Oxidation Processes to Pharmaceutical Degradation. **Catalysts**, Amsterdã: Elsevier, v. 13, n. 221, pp. 1–36.

Hamilton, D. J., Ambrus, A., Dieterle, R. M., Felsot, A. S., Harris, C. A., Holland, P. T., Katayama, A., Kurihara, K., Linders, J., Unsworth, J., & Wong, S.S. (2003). Regulatory limits for pesticides residues in water. **Pure Appl. Chem.**, v. 75, n.8, pp. 1123–1155.

Jaafara, N. F., Jalil, A. A., Triwahyono, S., Ripin, A., & Ali, M. W. (2016). Significant effect of pH on photocatalytic degradation of organic pollutants using semiconductor catalysts. **Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)**, Malaysia, v. 78: 8–3, pp. 7–12.

Jagannatha, R. B., Ramu, S. S. R., Padaki, M., & Balakrishna. M. G. (2017). An efficient method for the synthesis of photo catalytically active ZnO nanoparticles by a gel-combustion method for the photo-degradation of Caffeine. **Nanochemistry Research**, Teerã: Iranian Chemical Society, v. 2, n. 1, pp. 86–95.

Kosmulski, M. (2002). The significance of the difference in the point of zero charge between rutile and anatase. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 99, n. 3, pp. 255–264.

Kumar, A., & Pandey, G. (2017). A review on the factors affecting the photocatalytic degradation of hazardous materials. **Material Science & Engineering International Journal**, Budapest: MedCrave, v. 1, n. 3, pp. 106–114.

Mahlalela, L. C., Casado, C., Marugán, J., Septien, S., Ndlovu, T., & Dlamini, L. N. (2021). Coupling biological and photocatalytic treatment of atrazine and tebuthiuron in aqueous solution. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, 101918.

Mai, L. T., Hoai, L. T., & Tuan, V. A. (2018). Effects of reaction parameters on photodegradation of caffeine over hierarchical flower-like ZnO nanostructure. **Vietnam Journal of Chemistry**, Wiley Online Library, v. 56, n. 5, pp. 647–653.

Martin, M. M. B., Sanchez, J. A. P., Garcia, J. L. S., Casas, J. L. L., & Malato, S. R. (2009). Effect of pesticide concentration on the degradation process by combined solar photo-Fenton and biological treatment. **Water Res.**, v. 43, n. 15, pp. 3838–3848.

Miao, J., Jia, Z., Lu, H. B., Habibi, D., & Zhang, L. C. (2014). Heterogeneous photocatalytic degradation of mordant black 11 with ZnO nanoparticles under UV–Vis light. **Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Amsterdã: Elsevier, v. 45, n. 4, pp. 1636–1641.

Montes, I. J. S., Silva, B. F., & Aquino, J. M. (2017). On the performance of a hybrid process to mineralize the herbicide tebuthiuron using a DSA anode and UVC light: a mechanistic study. **Appl. Catal. B: Environmental**, v. 200, pp. 237–245.

Muneer, M. (2005). Heterogeneous photocatalysed reaction of three selected pesticide derivatives, protham, propachlor and tebuthiuron in aqueous suspensions of titanium dioxide. **Chemosphere**, v. 61, n. 4, pp. 457–468.

Oliveira, R., da Silva Martini, W., & Sant'Ana, A. C. (2022). Combined effect involving semiconductors and plasmonic nanoparticles in photocatalytic degradation of pesticides. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, Amsterdã: Elsevier, v. 17, 100657.

Paiu, M., Lutic, D., Favier, L., & Gavrilescu, M. (2025), Heterogeneous Photocatalysis for Advanced Water Treatment: Materials, Mechanisms, Reactor Configurations, and Emerging Applications. **Appl. Sci.**, 15, 5681.

Pereira, G. F., Silva, B.F., Oliveira, R.V., Coledam, D. A. C., Aquino, J. M., Rocha-Filho, R. C., Bocchi, N., & Biaggio, S.R. (2017). Comparative electrochemical degradation of the herbicide tebuthiuron using a flow cell with a boron-doped diamond anode and identifying degradation intermediates. **Electrochimica Acta**, v. 247, pp. 860–870.

Prete, M. C., Oliveira, F. M., & Tarley, C. R. T. (2017). Assessment on the performance of nano-carbon black as an alternative material for extraction of carbendazim,

tebuthiuron, hexazinone, diuron and ametryn. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 1, pp. 93–102.

Rajamanickam, D., & Shanthi, M. (2016). Photocatalytic degradation of an organic pollutant by zinc oxide – solar process. **Arabian Journal of Chemistry**, Amsterdam: Elsevier, v. 9, pp. 1858-1868.

Rani, C. N. (2022). Photocatalytic degradation of caffeine in a slurry reactor with intermittent UV irradiation: optimization and response surface modelling. **Water Practice & Technology**, v. 17, n. 1, pp. 517-528.

Reis, I. B., Santos, M. D. R., de Oliveira, D. G., Lourdes, A. M. F. O., da Silva, J. C. J., Andrade, G. F. S., Matos, M. A. C., & Rocha, L. L. (2022). Photocatalytic degradation of salicylic acid employing TiO₂ and ZnO in aqueous suspension. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 4, pp. 25726–25743.

Rott, E., Pittmann, T., Wasielewski, S., Kugele, A., & Minke, R. (2017). Detoxification of pesticide-containing wastewater with Fe III, activated carbon and fenton reagent and its control using three standardized bacterial inhibition tests. **Water**, Switzerland, 9, 969.

Silva, M. R. A., Trovó, A. G., & Nogueira, R. F. P. (2007). Degradation of the herbicide tebuthiuron using solar photo-Fenton process and ferric citrate complex at circumneutral pH. **Journal of Photochemistry and Photobiology A-chemistry**, Lausanne: Elsevier B.V. Sa, v. 191, n. 2-3, pp. 187-192.

Souto, R. S., Sánchez-Montes, I., Santos, G. O. S., Cordeiro-Junior, P. J. M., Renata, Colombo, M. C. S., & Lanza, M. R. V. (2025). Electrochemical degradation of tebuthiuron pesticide using a flow reactor: Insights into the co-generation of oxidants and ecotoxicological risks. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.13, n. 2, 115528.

Toit, J. C. O., & Sekwadi, K. (2012). Tebuthiuron residues remain active in soil for at least eight years in a semi-arid grassland, South Africa, **African J. Range Forage Sci.**, v. 29, n. 2, pp. 85–90.

Van Dam, R. A., Camilleri, C., Bayliss, P., & Markich, S. J. (2004). Ecological risk assessment of tebuthiuron following application on tropical australian wetlands. **Hum. Ecol. Risk Assess.**, 10, pp. 1069–1097.

Velempini, T., Prabakaran, E., & Pillay, K. (2021). Recent developments in the use of metal oxides for photocatalytic degradation of pharmaceutical pollutants in water—A review. **Mater. Today Chem.**, v. 19, 100380.

Velmurugan, R., & Swaminathan, M. (2011). An efficient nanostructured ZnO for dye sensitized degradation of Reactive Red 120 dye under solar light. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdã: Elsevier, v. 95, n. 3, pp. 942–950.

Wang, H., Xie, C., Zhang, W., Cai, S., Yang, Z., & Gui, Y. (2007). Comparison of dye degradation efficiency using ZnO powders with various size scales. **Journal of Hazardous. Materials**, Amsterdã: Elsevier, v. 141, n. 3, pp. 645–652.

Yang, C., Yu, J., Li, Q., & Yu, Y. (2016). Facile synthesis of monodisperse porous ZnO nanospheres for organic pollutant degradation under simulated sunlight irradiation: The effect of operational parameters. **Materials Research Bulletin**, Amsterdam: Elsevier, v. 87, pp. 72-83.

